

SAIMAAN AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikka, Lappeenranta
Rakennustekniikka
Ympäristörakentaminen

Lassi Nurmi

KOLMIAKSIAALIKOKEEN KÄYTTÖÖNOTTO SAIMAAN AMMATTIKORKEAKOULUSSA

Opinnäytetyö 2010

TIIVISTELMÄ

Lassi Nurmi

Kolmiaksiaalikokeen käyttöönotto Saimaan ammattikorkeakoulussa,

26 sivua, 4 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu, Lappeenranta

Tekniikka, Rakennustekniikan koulutusohjelma

Ympäristörakentamisen suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2010

Ohjaaja: Matti Hakulinen, Saimaan ammattikorkeakoulu

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä kolmiaksiaalikoelaitteistoon ja tuottaa geotekniikan kursseihin opettajia, laboratoriohenkilökuntaa ja oppilaita palvelevat selkeät käyttöohjeet.

Työn suorittamisessa käytettiin hyödyksi laitetoimittajan tarjoamaa laitekoulutusta. Työ suoritettiin pääasiassa laboratoriotyönä kokeellisesti laitteeseen tutustumalla. Käyttöohjeiden käyttöönotossa oli suurena apuna se, että niitä oli mahdollista koekäyttää geotekniikan opiskelijalla ja laboratoriohenkilökunnalla.

Työ koostuu teoriaosasta, joka sisältää taustaa kolmiaksiaalikokeesta. Toisessa osiossa on suoritettu esimerkki suljetusta kolmiaksiaalikokeesta häiriintymättömillä näytteillä. Lisäksi työssä on liitteinä laitteiston käyttöohjeet, joita toivottavasti pystytään hyödyntämään opetuskäytössä.

Asiasanat: Kolmiaksiaalikoe, geotekniikka, käyttöohjeet

ABSTRACT

Lassi Nurmi

Introduction of Triaxial test in Saimaa University of Applied Sciences, 26 pages,
4 appendices

Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta

Technology, Civil and Construction Engineering

Municipal Engineering

Final Year Project 2010

Instructor: Matti Hakulinen, Saimaa University of Applied Sciences

The purpose of this project was to get acquainted with Triaxial test and to produce manuals for the need of courses in geotechnics. These manuals are targeted for the teachers, the laboratory personnel and for the students.

The introduction guidance of the apparatus was utilized in making this project. This project was mainly accomplished experimentally in laboratory. In the introduction of the manuals it was very helpful to be able to test the manuals on the users, laboratory personnel and a student.

This project consists of a theory part which contains the background of Triaxial test. Another part contains an example of Unconsolidated Undrained Triaxial test for undisturbed specimens. This project also contains the manuals of Triaxial test which are included as appendices that hopefully can be used in the teaching.

Keywords: Triaxial test, geotechnics, manuals

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ ABSTRACT

1 JOHDANTO	5
2 KOLMIAKSIAALIKOE	6
2.1 Yleistä.....	6
2.2 Kolmiaksiaalikoelaitteisto.....	9
2.3 Koemenetelmät	13
2.3.1 Suljettu leikkauskoe, UU-koe	13
2.3.2 Konsolidoitu nopea koe, CU-koe	13
2.3.3 Hidas, eli avoin koe, CD-koe.....	14
2.4 Kokeessa käytetyt näytteet.....	14
2.5 Koetulosten käyttö	15
3 ESIMERKKI UU-KOKEESTA.....	16
3.1 Näytteiden tiedot	16
3.2 Kokeen olosuhteet ja tiedot	17
3.3 Kokeen tulokset.....	17
3.3.1 Ensimmäinen kuormitus.....	17
3.3.2 Toinen kuormitus	18
3.3.3 Kolmas kuormitus	20
3.3.4 Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen Mohrin jännitysympyröiden avulla	21
3.3.5 Tulosten vertailu CU-kokeeseen.....	22
4 YHTEENVETO.....	24
LÄHTEET	26

LIITTEET

Liite 1 Häiriintyneen hienorakeisen näytteen valmistaminen

Liite 2 Laitteiston säätöyksikön käyttöohje

Liite 3 Suljetun kolmiaksiaalikokeen käyttöohje

Liite 4 Suljetun UU-kokeen tulokset 15.03.2010

1 JOHDANTO

Saimaan ammattikorkeakoulu täydensi jo ennestään laajaa laboratoriokalustaan hankkimalla toukokuussa 2009 kolmiakσιαalikoelaitteiston. Laitteiston toimitti Testele Oy ja käyttöönotto koulutuksen tarjosi John Turner.

Kolmiakσιαalikoelaitteisto on monipuolinen ja tarkka, mutta myös käyttäjälleen vaativa maan muodonmuutos- ja lujuusominaisuuksien tutkimusväline. Laitteiston avulla saadaan maalajeille määritettyä koheesion ja kitkakulman arvo. Laitteistolla voi suorittaa kolme eri koemenetelmää, koheesiomaalajeille suljettu leikkauskoe (UU-koe) ja konsolidoitu nopea koe (CU-koe) sekä kitkamaalajeille avoinkoe (CD-koe).

Opinnäytetyön tarkoituksena on tehdä Saimaan ammattikorkeakoululle käyttöönottotutkielma laitteistosta. Työ on rajattu koskemaan suljetun leikkauskokeen suorittamista. Tavoitteena on laatia yksityiskohtaiset käyttöohjeet laitteistosta ja kokeesta, jotta opiskelijat voivat tulevaisuudessa suorittaa kokeen ohjeiden perusteella.

Työ tehdään pääasiassa laboratoriotyönä, ja se koostuu kahdesta osiosta. Teoriaosiossa käsitellään yleisesti laitteistoa, koemenetelmiä ja kokeen suoritusvaiheita. Toisessa osiossa käydään läpi esimerkkinä suljettu kolmiakσιαalikoe häiriintymättömillä näytteillä. Esimerkkikokeen tuloksia verrataan toisen laboratorion toisella menetelmällä saatuihin tuloksiin.

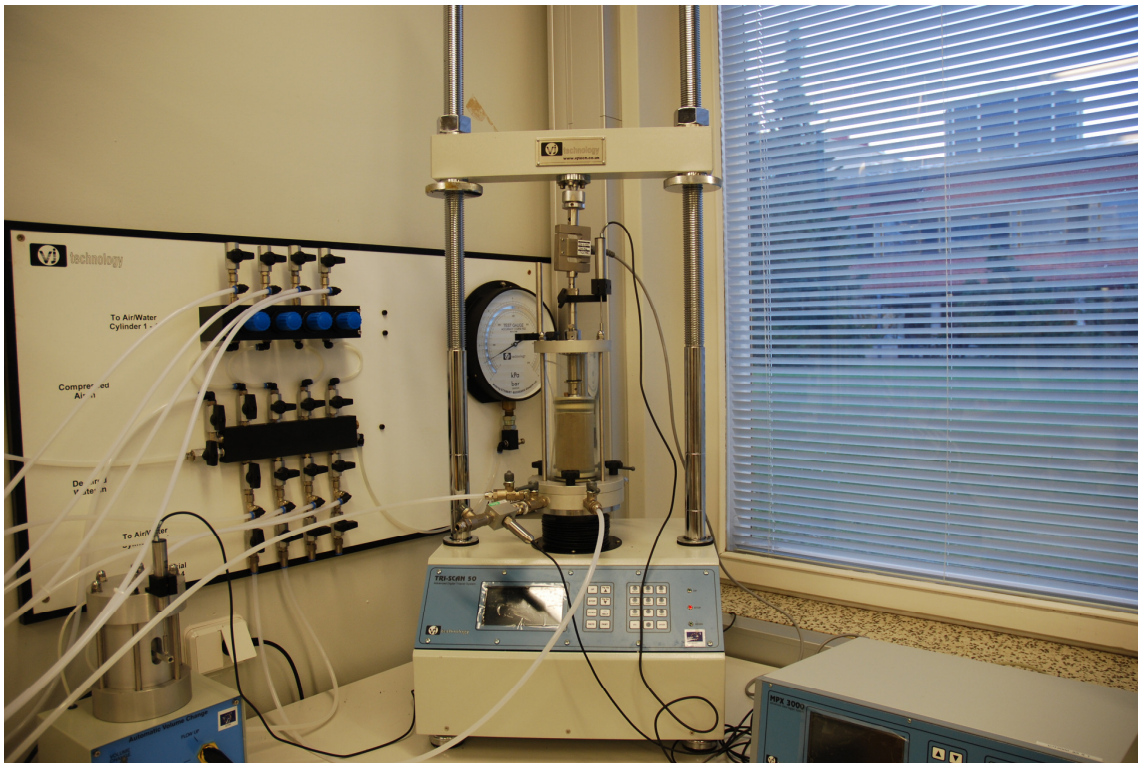
Työstä laaditaan lisäksi liitteenä käyttöohjeet kokeen suorittamisesta, säätöyksikön käytöstä ja häiriintyneen näytteen valmistamisesta.

Aineisto on kerätty laitetoimittajan koulutuksesta saadun materiaali perusteella. Lisäksi Geotekniikka 464 -kirja ja asiantuntijahaastattelut antavat riittävästi lisämateriaalia opinnäytetyön suorittamista varten.

2 KOLMIAKSIAALIKOE

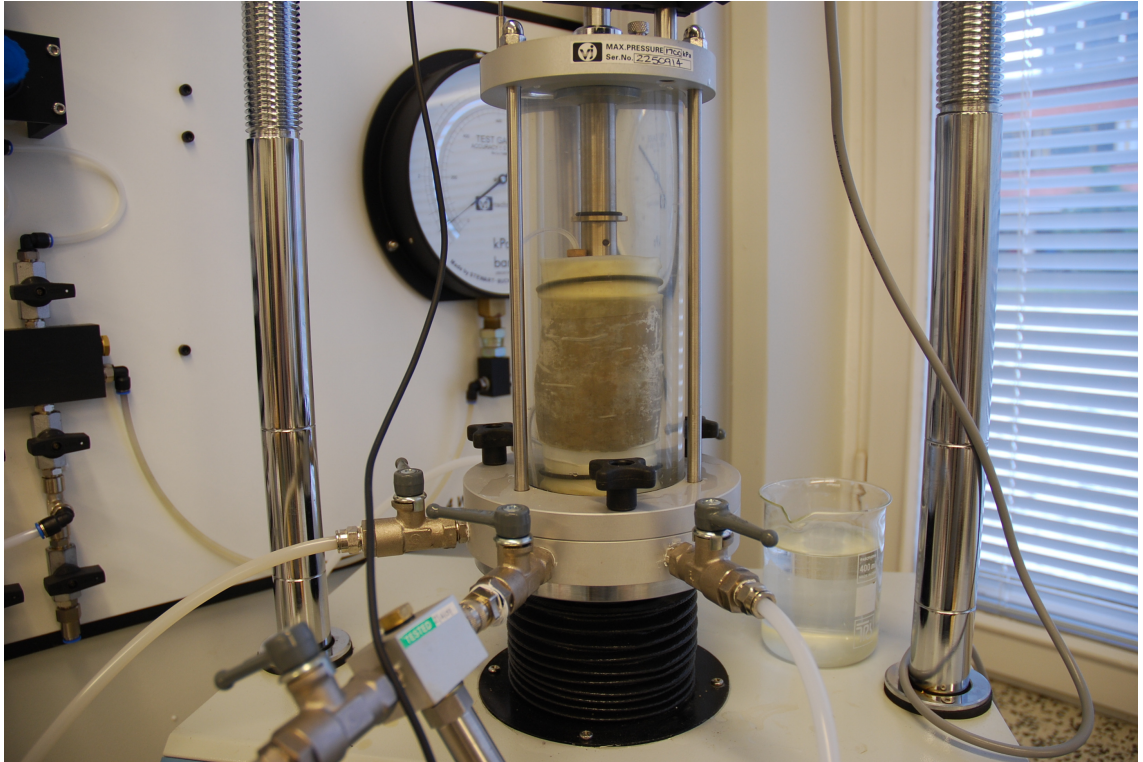
2.1 Yleistä

Kolmiakσιαalikoe on monipuolinen maan muodonmuutos- ja lujuusominaisuuksien määrittämiseen soveltuva tutkimuslaite (kuva 2.1). Kolmiakσιαalikokeella mitataan näytteen aksiaalista kuormitusta, sellipainetta, näytteen aksiaalista muodonmuutosta ja huokosvedenpainetta. Tarvittaessa voidaan myös mitata kyllästyspainetta sekä säteittäistä muodonmuutosta. (Kolisoja 2005.)



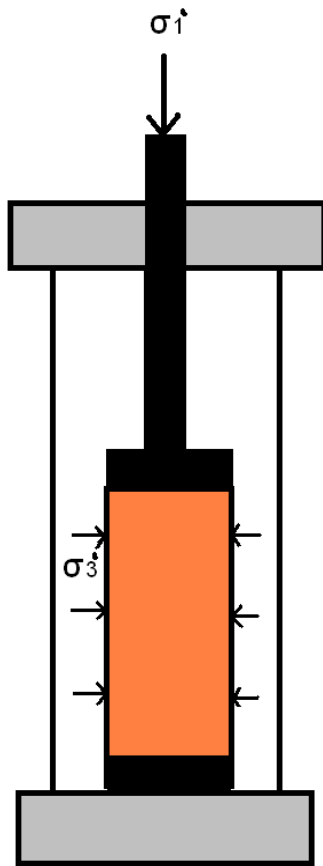
Kuva 2.1 Kolmiakσιαalikoelaitteisto

Kokeessa sylinterin muotoinen, kumikalvoilla ympäröity maanäyte asetetaan koeselliin. Selli täytetään vedellä, ja koesellissä maanäytteeseen vaikuttavaa kolmiulotteista aksiaalisymmetristä jännitystilaa voidaan säädellä muuttamalla sellissä vaikuttavaa painetta sekä kuormittamalla aksiaalisesti näytteen yläpäässä olevan kuormitushatun välityksellä (kuva 2.2). Näytteen kuivatusolosuhteita voidaan säädellä halutulla tavalla. (Kolisoja 2005.)



Kuva 2.2 Näyte koesellissä

Kokeessa kuormitetaan sylinterinmuotoista näytettä kolmen toisiaan vastaan kohtisuoran akselin suunnassa (kuva 2.3). Näin ollen näytteen jännitystilanne saadaan vastaamaan mahdollisimman hyvin todellista tilannetta. Kumikalvon sisään asennettu maanäyte laitetaan läpinäkyvään selliin päätylevyjen väliin. Sellissä olevan veden paineella synnytetään aluksi kaikissa kolmessa akselin-suunnassa yhtäsuuret pääjännitykset. Näytettä aletaan puristaa kokoon pystysuunnassa tasaisella nopeudella. Tällöin syntyy puristava pystysuora voima, joka aiheuttaa näytteeseen pystysuoran lisäjännityksen $\Delta\sigma_1$. Pystysuora pääjännitys σ_1 saadaan, kun lisäjännitykseen $\Delta\sigma_1$ lisätään sellipaine σ_3 . Kokeen aikana vallitseva huokosveden paine voidaan myös mitata. Näytteessä syntyy murtotilanne, kun lisäjännitys $\Delta\sigma_1$ saavuttaa suurimman arvonsa. (Rantamäki, Jääskeläinen & Tammirinne, 2004.)



Kuva 2.3 Sellin rakenne

Samasta kohteesta otetuista näytteistä tehdään yleensä kolme eri kuormituskoetta eri sellipaineilla. Sellipaineen arvo yleensä kaksinkertaistuu edelliseen kuormitustilanteeseen verrattuna, esimerkiksi $\sigma_3 = 50, 100, 200$. Toteutetuista kokeista saadaan murtotilanteen mukaisia jännitysympyröitä (Mohrin ympyröitä). Leikkauslujuuden kuvaajasuora on ympyröiden yhteinen tangenttisuora. Tangenttisuoran kulmakerroin kuvaa kitkakulmaa φ ja suoran ja y-akselin leikkauskohta koheesiota c (kuva 2.4). Maalajin leikkauslujuus τ_f on tangenttisuoran yhtälö (kaava 1).

$$\tau_f = c + (\sigma - u) \tan \varphi \quad (1)$$

c = koheesio

σ = jännitys

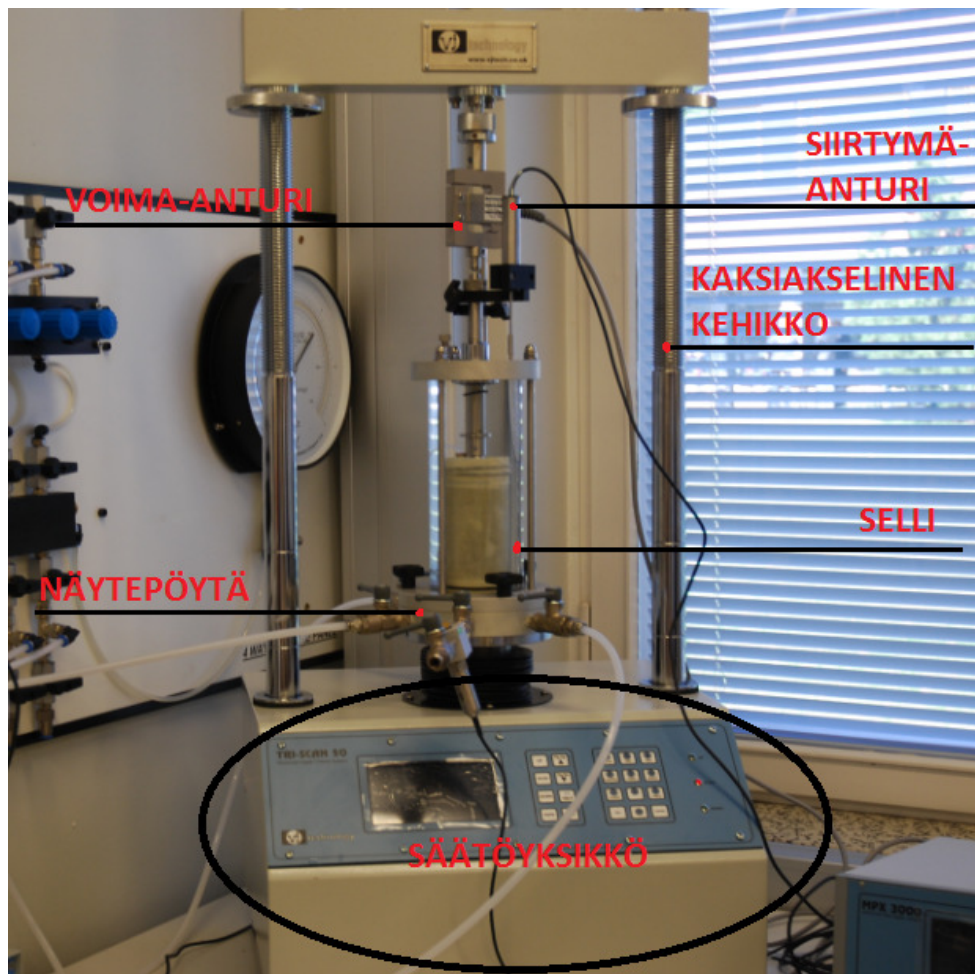
u = huokosvedenpaine

φ = kitkakulma

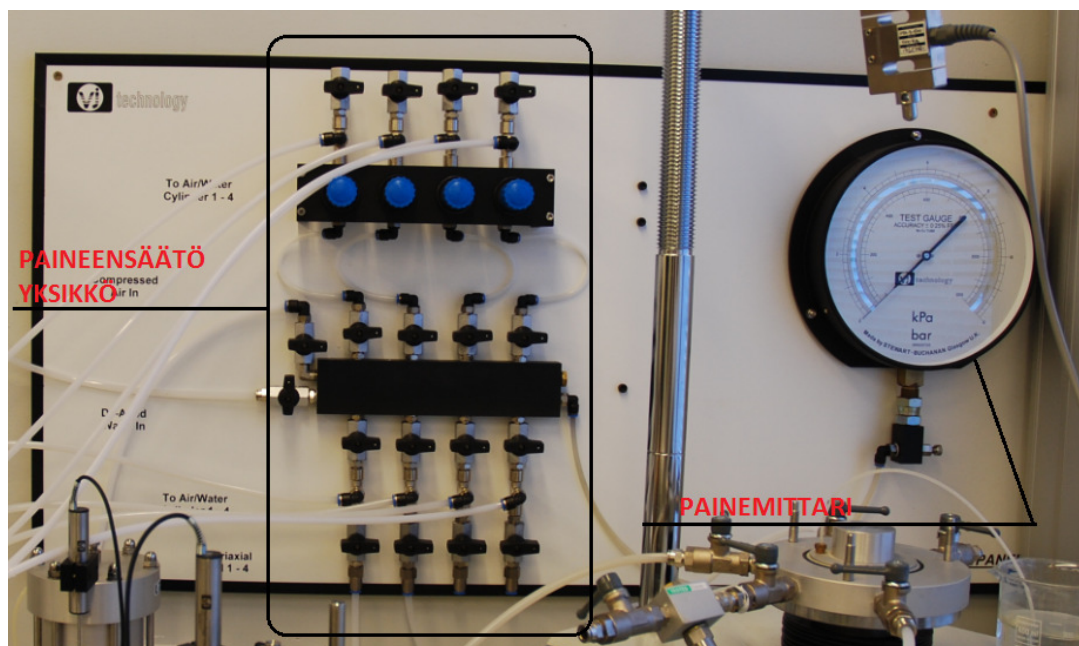
- VJT3000 - MPX3000 Data Logger -tiedonkeruuyksiköstä (kuva 2.5)
- VJT5010 - TriSCAN 50 (Standard) -säätöyksiköstä (kuva 2.6)
- kaksiakselisesta kehikosta, joka on kiinnitetty säätöyksikköön (kuva 2.6)
- voima-anturista, joka on kiinnitetty kaksiakseliseen kehikkoon (kuva 2.6)
- näytepöydästä, joka on kiinnitetty säätöyksikköön (kuva 2.6)
- sellistä (kuva 2.6)
- siirtymäanturista, joka on kiinnittyneenä sellissä (kuva 2.6)
- paineensäätöyksiköstä, jossa on etu- ja takapainelinja (kuva 2.7)
- painemittari (kuva 2.7)
- VJT0310 tilavuudenmuutosmittausyksiköstä (kuva 2.8)
- tilavuudenmuutosmitta-anturista, joka on kiinnitetty tilavuudenmuutosmittausyksikköön (kuva 2.8)
- paineselleistä (kuva 2.9)
- vesisäiliöstä (kuva 2.10).



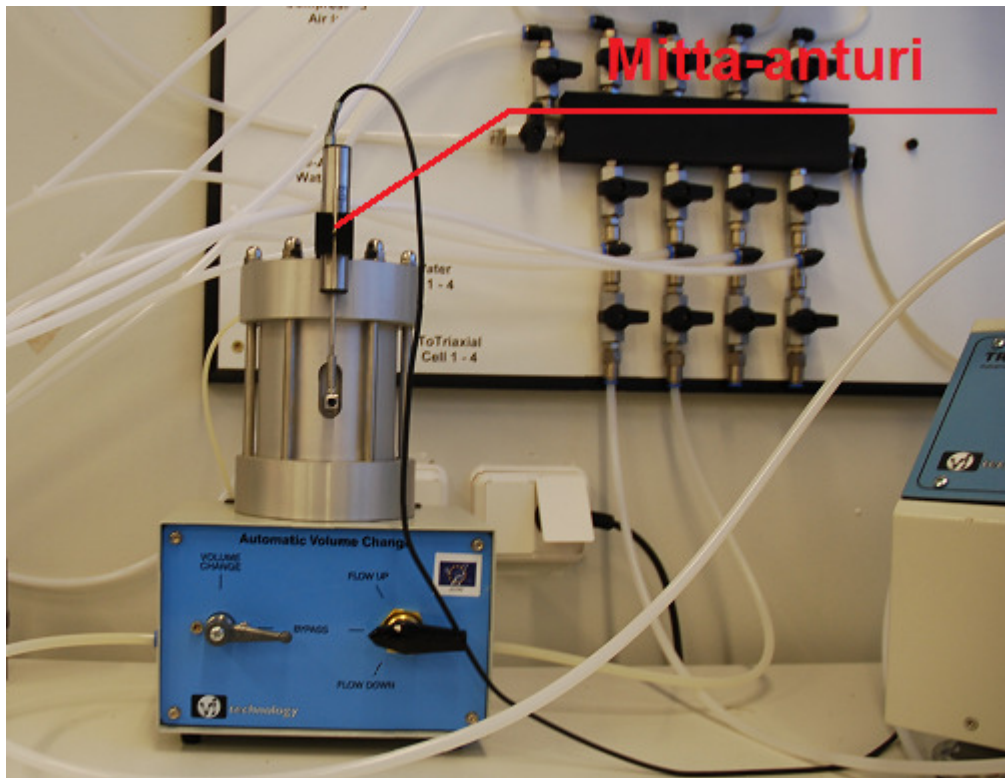
Kuva 2.5 Tiedonkeruuyksikkö, joka kerää tiedot voima-, siirtymä- ja tilavuudenmuutosantureilta



Kuva 2.6 Säätyyksikkö, selli, kaksiakselinen kehikko, siirtymäanturi ja voimaanturi



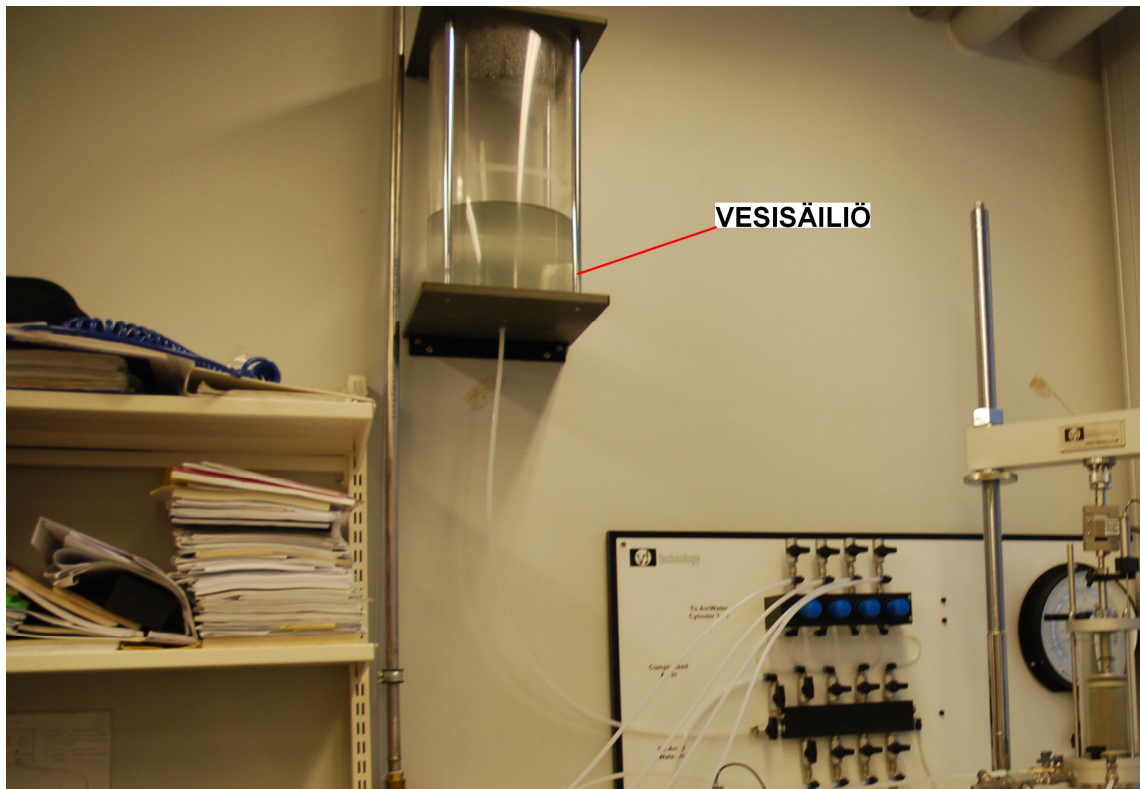
Kuva 2.7 Paineensäätöyksikkö ja painemittari



Kuva 2.8 Tilavuudenmuutosmittausyksikkö ja mitta-anturi



Kuva 2.9 Painesellit



Kuva 2.10 Vesisäiliö

2.3 Koemenetelmät

2.3.1 Suljettu leikkauskoe, UU-koe

UU-koe on nopea konsolidoimaton koe, jossa näyte leikataan konsolidoimattomana suljetussa ympäristössä ilman huokosvedenpaineenmittausta. Kokeessa kuormitus ja leikkaus toimitetaan niin nopeasti, että näyte ei ehdi kuormituslisäyksen, eikä leikkausvoiman vaikutuksesta lainkaan konsolidoitua. (Kolisoja 2005; Rantamäki ym. 2004, 133.)

Suljettu kolmiaksaalikoe perustuu kokonaisjännityksiin (σ), ja sen avulla määritetään suljettu leikkauslujuus (s_u) hienorakeisille maalajeille.

2.3.2 Konsolidoitu nopea koe, CU-koe

CU-koe on nopea konsolidoitu koe, jossa näyte ensin konsolidoidaan, mutta leikataan tämän jälkeen suljetuissa olosuhteissa. Yleensä kokeen yhteydessä

mitataan myös näytteeseen kehittyvää huokosvedenpainetta. Kokeessa maanäytteen kuormitus ennen leikkausta tapahtuu niin hitaasti, että näyte ehtii täysin konsolidoitua. Sen sijaan näytteen leikkaus toimitetaan niin nopeasti ja sellaisissa olosuhteissa, että veden ulospurkautumista näytteestä ja sen seurauksena konsolidaatiota leikkausvoiman vaikutuksesta ei ehdi tapahtua. (Kolisoja 2005; Rantamäki ym. 2004, 133.)

Konsolidoitu nopea koe perustuu tehokkaisiin jännityksiin (σ') ja sen avulla määritetään tehokkaat lujuusparametrit (tehokas kitkakulma ϕ' ja tehokas koheesio c'). Kokeen aikana mitatut huokosvedenpaineen arvot vähennetään kokonaisjännityksistä, jolloin saadaan tehokkaat jännitykset selville ($\sigma' = \sigma - u$).

2.3.3 Hidas, eli avoin koe, CD-koe

CD-koe on hidas ja avoin koe, jossa näyte ensin konsolidoidaan ja leikataan tämän jälkeen avoimissa olosuhteissa. Kokeessa sekä tutkittavan maan kuormitus että leikkaus toimitetaan niin hitaasti ja sellaisissa olosuhteissa, että tutkittava maanäyte ehtii sekä kuormituslisäyksen että leikkausvoiman vaikutuksesta kokoonpuristua täydellisesti. Tällöin huokosissa oleva vesi ehtii väistyä siinä määrin, että huokosvedenpainetta ei esiinny. (Kolisoja 2005; Rantamäki ym. 2004, 133.)

Karkearakeisten maalajien lujuusominaisuudet tutkitaan aina avoimella kokeella. Maalajit ovat siinä määrin vettä läpäiseviä, että niihin ei muodustu huokosvedenpainetta kuormituksen johdosta. Ne tiivistyvät myös kuormituksen lisääntymisen tahdissa. Täten karkearakeisten maalajien leikkauslujuus muodostuu kin aina avoimen leikkauslujuuskokeen olosuhteita vastaavasti. (Rantamäki ym. 2004, 134.)

2.4 Kokeessa käytetyt näytteet

Suomessa yleisimmin käytetty näytehalkaisija on 50 mm, mutta myös 38 mm näytehalkaisijaa käytetään yleisesti. Näytteen korkeuden ja halkaisijan suhde

pitää olla 2–2,25. Esimerkiksi, jos näyte on 50 mm halkaisijaltaan, niin korkeuden tulee olla 100 mm -112,5 mm. (Kolisoja 2005)

Hienorakeisten maalajien tutkimisessa käytetään häiriintymättömiä, eli luonnontilaisia, sekä laboratoriossa valmistettuja häiriintyneitä maanäytteitä. Kokeiden näytesyvytykset valitaan luokituskokeiden ja muiden pohjatutkimusten (siipikairaus, CPTU) perusteella. Geoteknisen suunnittelijan Jetro Matilaisen mukaan luonnontilaisen näytteen käyttö hienorakeisten maalajien lujuusominaisuuksien tutkimisessa on välttämätöntä. Tällöin saadaan mahdollisimman tarkka kuvaus maaperän olosuhteista. Häiriintyneitä laboratoriossa kasattuja näytteitä käytetäänkin pääsääntöisesti poikkeustapauksissa sekä opetuskäytössä. Häiriintyneen hienorakeisen näytteen valmistaminen on esitetty liitteessä 1.

Karkearakeisille aineksille voidaan käyttää yleensä vain häiriintyneitä näytteitä. Näyte rakennetaan erityisen sullontasäiliön avulla.

2.5 Koetulosten käyttö

Kolmiakσιαalikoe on leikkauslujuuden ja jännitys-muodonmuutosominaisuuksien määrittämismenetelmistä tarkin ja monipuolisin, mutta myös käyttäjälleen vaativin (Rantamäki ym. 2004, 134). Tästä johtuen kokeen tuloksia käytetäänkin pääsääntöisesti hyväksi suurten rata- ja väylätöiden suunnittelussa stabiliteettilaskennassa (Matilainen 2009).

Suomessa käytetyin kolmiakσιαalikoe on konsolidoitu nopea koe, CU-koe. Kohteissa saadaan tehokkaiden jännitysten avulla määritettyä hienorakeisille maalajeille tehokas koheesio (c') ja tehokas kitkakulma (ϕ'). Nämä tiedot ovat geotekniselle suunnittelijalle tärkeitä tarkasteltaessa pitkäaikaisia kuormitustilanteita, ja ne johtavat taloudellisiin mitoituksiin. CU-koetta käytetäänkin kohteissa, joissa on pehmeitä, löyhiä savia. Esimerkiksi kokeen tuloksia käytettiin hyödyksi suunniteltaessa Vainikkalan ratapihan laajennusta. Kohteessa saviselle pohjamaalle rakennettiin paalulaatta lisäraiteita varten. (Matilainen 2009.)

Suljettua leikkauskoetta (UU-koetta) käytetään tarkasteltaessa lyhytaikaisia kuormitustilanteita. Koe perustuu kokonaisjännityksiin (σ), ja sen avulla voidaan määrittää suljettu leikkauslujuus (s_u) hienorakeisille maalajeille. Kokeen yhteydessä voidaan myös määrittää suljetun tilan kimmomoduuli. UU-koetta käytetään useimmiten samoissa kohteissa, joissa käytetään myös CU-koetta, eli kohteissa, joissa pitää tarkastella sekä pitkäaikaisia että lyhytaikaisia tilanteita. Kyseisiä tilanteita ovat esimerkiksi suuret rata- ja väylähankkeet.

(Rantamäki 2004 ym., 133 - 134; Teiden pohjarakenteiden suunnitteluprosessit 2001.)

3 ESIMERKKI UU-KOKEESTA

Koe suoritettiin 15.03.2010 Saimaan ammattikorkeakoulun maalaboratoriossa. Kokeen suoritti laboratorio mekaanikko Pentti Holopainen, joka käytti hyväkseen liitteen 3 laitteiston käyttöohjeita.

3.1 Näytteiden tiedot

Näytteet ovat peräisin Vainikkalan ratapihatyömaalta, jossa savisen pohjamaan päälle on perustettu paalulaatta. Näytteet ovat otettu 05.05.2009, ja niitä on säilytetty laboratorion kylmäkaapissa. Näytteet on toimittanut Ramboll Oy, joka on vastannut myös kohteen suunnittelusta. Kokeessa käytetyt kolme näytettä on otettu syvyyksiltä 4,0–4,5 m (taulukko 3.1).

Taulukko 3.1 Näytetiedot

	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3
Korkeus (mm)	101	101	101
Halkaisija (mm)	50	50	50
Märkäpaino (g)	362,6	364,1	357,4
Syvyys (m)	4,00- 4,17	4,17- 4,32	4,32- 4,50
Vesipitoisuus %	30	30	30

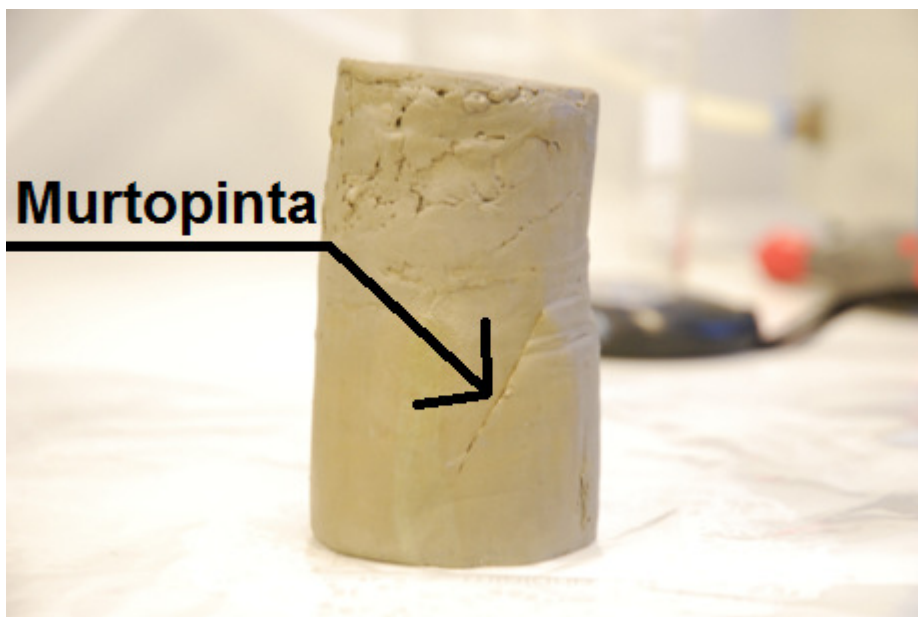
3.2 Kokeen olosuhteet ja tiedot

Nopeassa, suljetussa kolmiakσιαalikokeessa kuormitusnopeus valitaan siten, että arvioitu murtotilanne tapahtuu noin 5 - 15 minuutin kuluttua kokeen aloituksesta. Tästä johtuen nopeuden arvoksi valitaan useimmiten 1 - 2 mm/min. Tässä kokeessa käytettiin 1,5 mm/min kuormitusnopeutta kaikille näytteille. Sellipaineiden arvot valittiin alkujännitystilän mukaan, jotka selvitettiin ödometrikkeen avulla toisessa laboratoriossa.

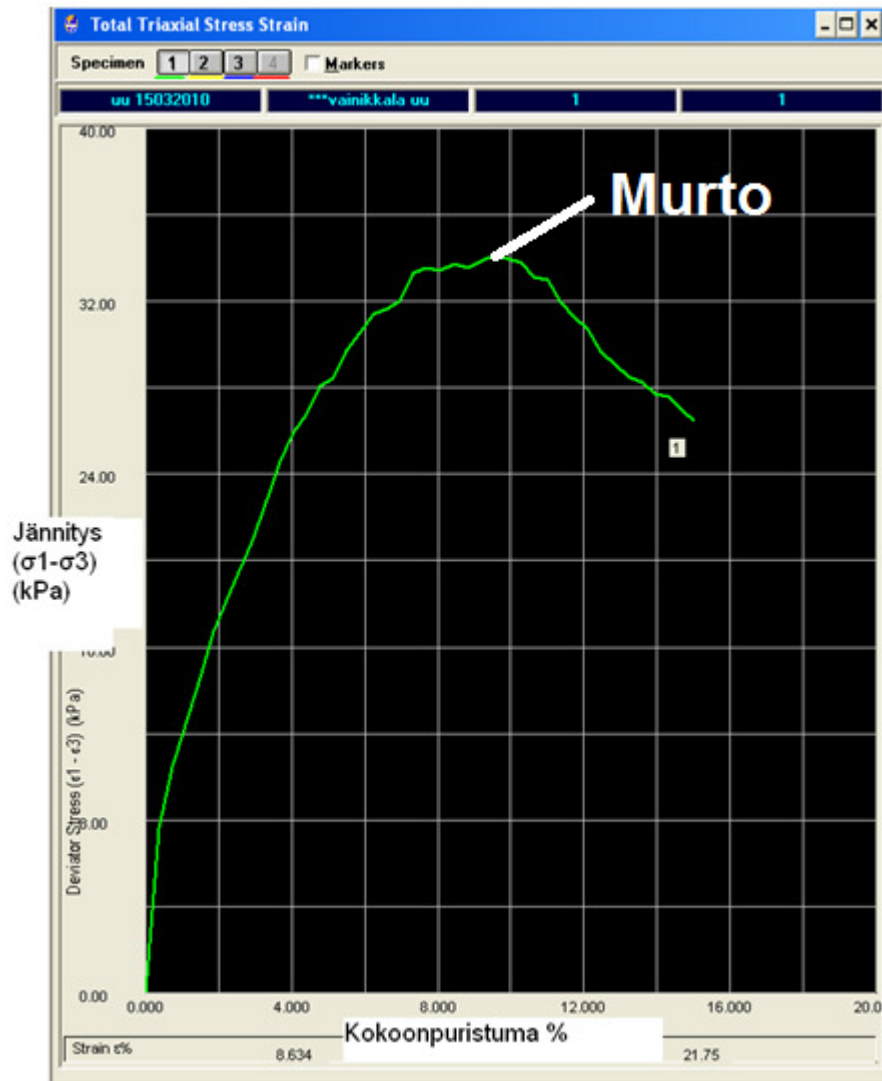
3.3 Kokeen tulokset

3.3.1 Ensimmäinen kuormitus

Ensimmäinen kuormitus suoritettiin 25 kPa sellipaineella. Näytteen painuma murtohetkellä oli 9,52 mm ja koe lopetettiin painuman arvon ollessa 12,11 mm. Näytteen murtopinta on selvästi silmämääräisesti havaittavissa kuvasta 3.1. Myös jännitys-muodonmuutoskuvaajasta voidaan murtotilanne havaita (kuva 3.2). Näytteen leikkauslujuuden arvoksi määritettiin 17,11 kPa. Tarkemmat tulokset kokeesta löytyvät liitteestä 4.



Kuva 3.1 Ensimmäinen näyte kuormituksen jälkeen



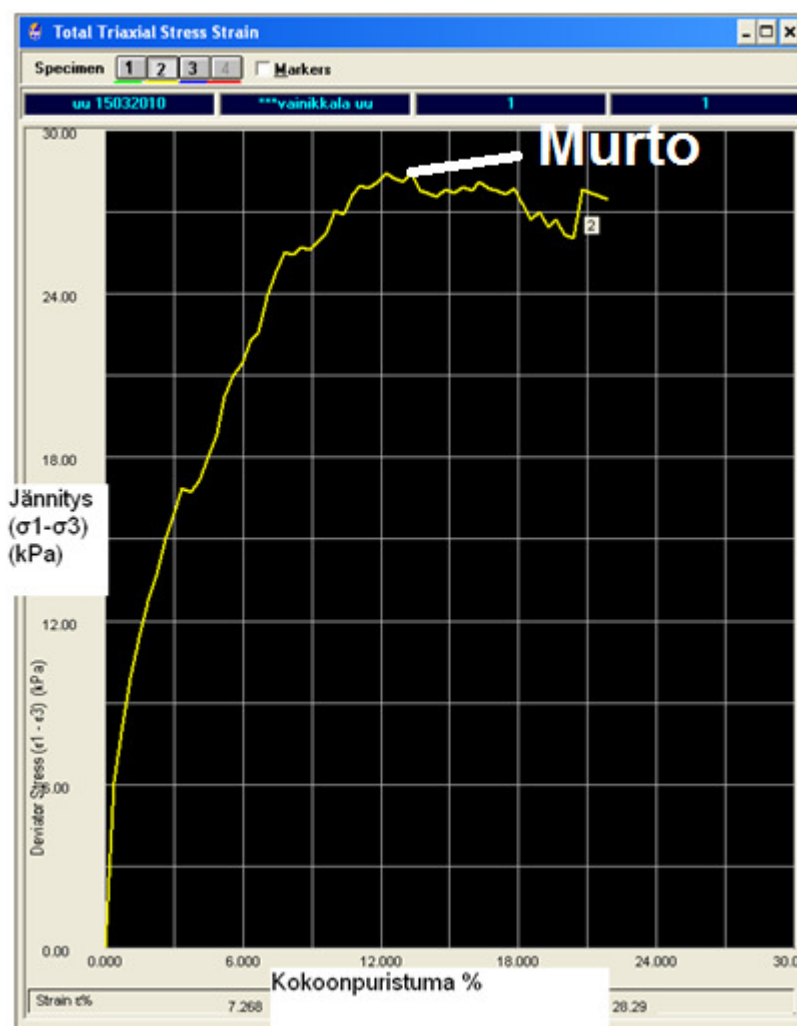
Kuva 3.2 Ensimmäisen kuormituksen jännitys-muodonmuutoskuvaaja

3.3.2 Toinen kuormitus

Toinen kuormitus suoritettiin kaksi kertaa suuremmalla sellipaineella ensimmäiseen kokeeseen verrattuna. Näytteen painumaksi murtohetkellä mitattiin 13,33 mm ja koetta jatkettiin aina 14,23 mm painuman arvoon saakka. Leikkauslujuudeksi saatiin määritettyä 14,23 kPa. Näytteestä tehtiin kokeen jälkeen kartiokoe ja leikkauslujuuden arvoksi määritettiin 14,5 kPa. Toinen näyte ei leikkaantunut selvästi verrattuna ensimmäiseen kuormitukseen, eikä leikkauspintaa voi silmäääräisesti havaita (kuva 3.3). Tarkemmat tulokset kokeesta löytyvät liitteestä 4.



Kuva 3.3 Toinen näyte kuormituksen jälkeen



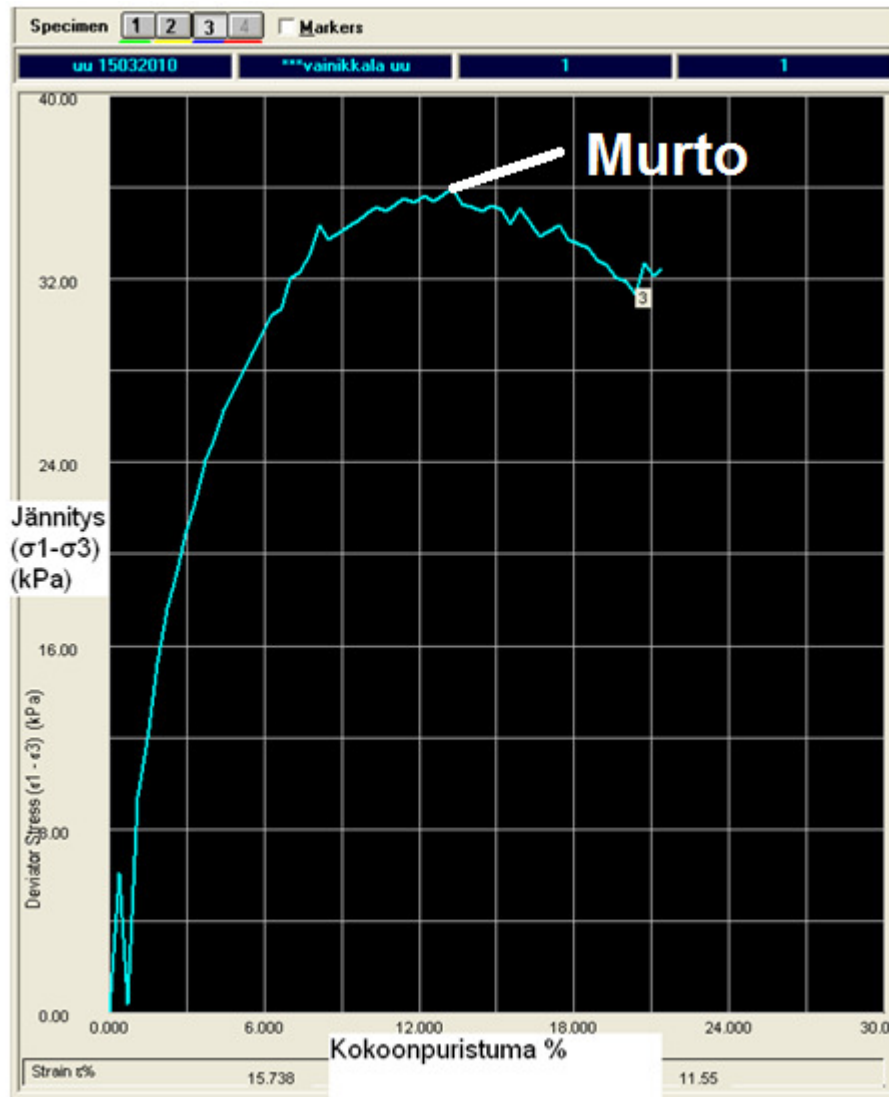
Kuva 3.4 Toisen kuormituksen jännitys-muodonmuutoskuvaaja

3.3.3 Kolmas kuormitus

Kolmas kuormitus suoritettiin 100 kPa sellipaineella, eli kaksi kertaa suuremmalla arvolla toiseen kuormitukseen verrattuna. Painuman arvo murtohetkellä oli 13,30 mm ja leikkauslujuudeksi määritettiin 17,98 kPa. Kartiokokeella näytteen leikkauslujuudeksi saatiin 16,90 kPa. Toisen kuormituksen tapaan ei leikkauspintaa näytteestä pysty näkemään silmämääräisesti (kuva 3.5).



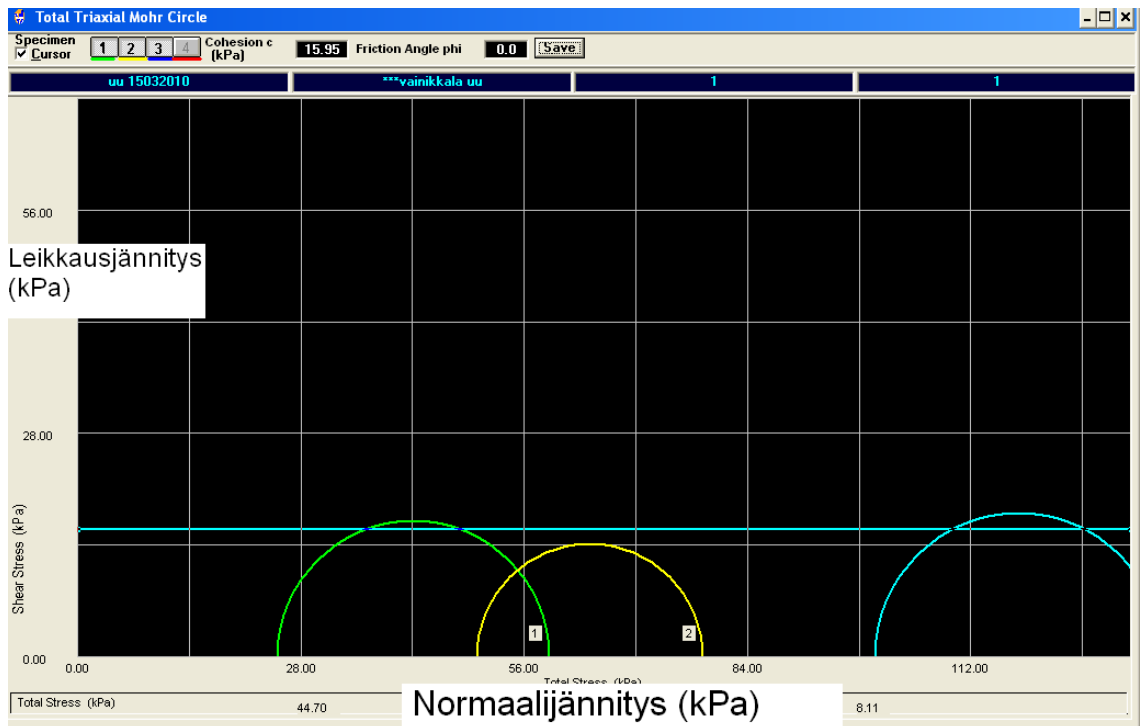
Kuva 3.5 Kolmas näyte kuormituksen jälkeen



Kuva 3.6 Kolmannen kuormituksen jännitys-muodonmuutoskuvaaja

3.3.4 Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen Mohrin jännitysympyröiden avulla

Suljetun kolmiakselikokeen tulokset määritettiin graafisesti Mohrin jännitysympyröiden avulla. Tangenttisuora sovitettiin manuaalisesti kolmen kuormitustilanteen jännitysympyröiden avulla (kuva 3.7).



Kuva 3.7 Mohrin jännitysympyrät ja tangenttisuora. Vihreä ympyrä kuvaa ensimmäistä kuormitusta, keltainen toista ja sininen kolmatta

Kuvasta 3.7 huomataan, että tangenttisuora leikkaa y-akselin leikkausjännityksen arvossa 15,95 kPa. Tämä arvo on maalajin koheesio. Koska tangenttisuora on vaakasuora, niin kitkakulman arvo on 0. Tästä johtuen maalajin lujuusominaisuudet muodostuvat ainoastaan koheesiosta ja maalajin suljettu leikkauslujuus on siis $s_u=16$ kPa.

3.3.5 Tulosten vertailu CU-kokeeseen

Ramboll teetti kolmiaksaalikokeet myös toisessa laboratoriossa, missä suoritettiin konsolidoituneet nopeat kokeet (CU-kokeet) näytteille, jotka oli otettu samasta syvyydestä, mitä olimme kokeissamme käyttäneet. UU- ja CU-kokeiden tuloksia ei suoranaisesti voida keskenään vertailla. CU-kokeella saadaan tehokkaat lujuusparametrit, joita käytetään pitkäaikaisten kuormitusilanteiden vakavuuslaskelmissa, käyttäen hyväksi ns. $c - \phi$ -menetelmää (kaava 1.). UU-kokeen tuloksia käytetään lyhytaikaisten tilanteiden tarkastelussa, käyttäen ns. $\phi = 0$ -menetelmää stabiliteettitilan laskennoissa (kaava 2).

$$\tau_f = s_u = c, (\varphi=0) \quad (2)$$

τ_f = Leikkauslujuus

s_u = Suljettu leikkauslujuus

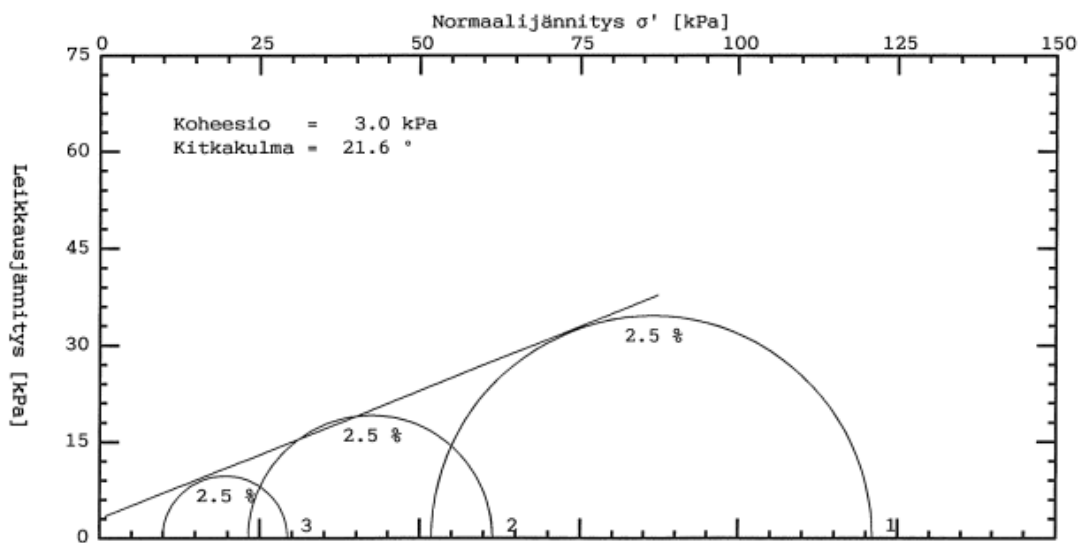
c = Koheesio

φ = Kitkakulma

Toinen laboratorio suoritti kolmiakselialikokeet 18. – 20. 5.2009 ja sai tuloksiksi kuvan 3.8 mukaiset arvot.

						Asiakas	Ramboll Finland O
						Kohde	Vainikkalan ratap
						Työnumero	
						Piste	14
						Y	
						X	
						Maanpinta	

Nro	Sellip	Tiedosto	Nopeus	Syvyys	Koepvm
1	100	D17_2	.015	4.37-4	19.5.2009
2	55	D17_1	.015	4.20-4	18.5.2009
3	30	D17_3	.015	4.54-4	20.05.2009



Kuva 3.8 Toisen laboratorion suorittamien CU-kokeiden tulokset

Kokeen avulla laboratorio sai koheesio arvoiksi 3,0 kPa ja kitkakulmaksi 21,6 astetta.

4 YHTEENVETO

Kolmiaksiaalikoe osoittautui maineensa mukaisesti vaativaksi kokeeksi. Jo alkuvaiheessa huomasimme, että kyseessä ei ollut yksinkertainen laitteisto. Suomenkielisen koulutuksen ja materiaalin puute lisäsivät opinnäytetyön haastavuutta ja aiheuttivat hieman ongelmia työn edetessä. Kaikesta huolimatta laitteestoon tutustuminen ja työn suorittaminen sujui ilman suurempia ongelmia.

Opinnäytetyöni alkoi toukokuussa 2009 englantilaisen John M Turnerin laitekoulutuksella. Ensimmäiseksi kokosimme laitteiston ja asensimme sen käyttövalmiuteen, jonka jälkeen kalibroimme mitta-anturit. Tämän jälkeen aloimme opetella häiriintyneen näytteen valmistamista ja suljetun leikkauskokeen (UU) suorittamista. Kokeen suorittaminen sujui hyvin alkuvaikeuksista huolimatta. Sen sijaan koulutus vaiheessa emme onnistuneet suorittamaan onnistuneesti CU-koea kouluttaja John Turnerin opastuksesta huolimatta. Ongelmaksi kokeessa osottautuivat kyllästämisen- ja konsolidointivaiheen aikaiset huokosvedenpaineen mittavirheet, joihin ei edes kokenut kouluttaja osannut löytää ratkaisua.

Opinnäytetyön pääasiallisena tarkoituksena oli tutustua laitteistoon ja laatia käyttöohjeet UU-kokeen suorittamisesta. Laadittujen ohjeiden avulla opiskelija Ville Relander ja laboratoriomekaanikko Pentti Holopainen rakensivat häiriintyneet näytteet ja suorittivat kokeen. Molemmat pitivät ohjeita selkeinä ja yksiselitteisinä, joiden avulla koe oli helppo suorittaa. Tutkin myös työni esimerkkitapauksessa saven suljettua leikkauslujuutta UU-kokeella ja sain tulokseksi saman-suuntaisen leikkauslujuuden arvon, kuin kartiokokeella.

Työni alkuperäisenä tavoitteena oli tutustua UU-kokeen lisäksi myös CU-kokeeseen, joka on käytetyin kolmiaksiaalikoemenetelmä. Kolmiaksiaalikoe on Suomessa harvinainen laitteisto ja Saimaan ammattikorkeakoululla olisikin hyvät mahdollisuudet tuottaa CU-koe. Yksinään UU-kokeella ei ole tuotteistamismahdollisuutta, koska suljetun leikkauslujuuden määrittäminen onnistuu halvemmin ja helpommin muilla konstein.

Koe on työläs ja vaikea, joten se ei välttämättä sovellu isojen ryhmien opetuskäyttöön. Sen sijaan geotekniikasta ja kolmiakksiaalikoikeesta kiinnostuneille ja asiaan perehtyneille opiskelijoille ohjeet antavat mahdollisuuden tutustua laajemmin savien lujuusominaisuuksiin. Opinnäytetyöni avulla on helppo tutustua laitteistoon ja sen käyttöön, mutta lopullisen tavoitteen ja laitteen maksimaalisen hyödyn saavuttamiseksi kyllästys- ja konsolidointivaiheen mittavirheiden ongelmien ratkaiseminen on välttämätöntä. Suomenkielinen ja selkeä laitteistokoulutus on mielestäni suositeltavaa, jotta nämä ongelmat voidaan ratkaista.

LÄHTEET

Kolisoja, P. 2005. Pohjarakennussuunnittelun PD-ohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Pohja- ja maarakenteiden laboratorio.

Matilainen, J. Haastattelu 24.11 2009

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 2004. Geotekniikka. 20. painos. Helsinki: Otava.

Teiden pohjarakenteiden suunnitteluprosessit 2001. Helsinki: Oy Edita Ab

Turner, J. 2003. The measurement of undrained shear strength in triaxial compression, unconsolidated undrained triaxial test. Issue 1. JT Consultant Services.

LIITE 1

Häiriintyneen hienorakeisen näytteen valmistaminen

1. Näytettä hienonnetaan sullomisputken (halkaisija 50 mm) pohjalle. Näyte hienonnetaan sullomisputkeen viidessä osassa (kuva 1.).



Kuva 1. Näytteen hienontaminen

2. Kerroksien välissä näytettä tiivistetään sullomisnuijan avulla (kuva 2.). Ennen uuden kerroksen hienontamista tehdään puukolla tai naulan kärjellä näytteen tiivistettyyn pintaan muutamia karhennuksia (kuva 3.), jotta uusi kerros tarttuu paremmin eikä näyte myöhemmin leikkaudu kerroksien rajapinnasta.



Kuva 2. Näytteen sullonta



Kuva 3. Näytteen pinnan karhentaminen

3. Sullomisen jälkeen näyte asetetaan ulostyöntimeen ja työnnetään hieman ulos. Näytteen pää sahataan tasaiseksi rautasahalla sullomisputkea hyväksi käyttäen (kuva 4).



Kuva 4. Näytteen pään tasaaminen

4. Näytettä työnnetään 10 cm ulos sullomisputkesta. Näytteen toinen pää sahaan tasaiseksi käyttämällä hyväksi sullomisputkea (kuva 4.).



Kuva 5. Näytteen sahaaminen oikeaan pituuteen

5. Näyte otetaan pois ulostyöntimestä työntämällä ja varovasti nostamalla.

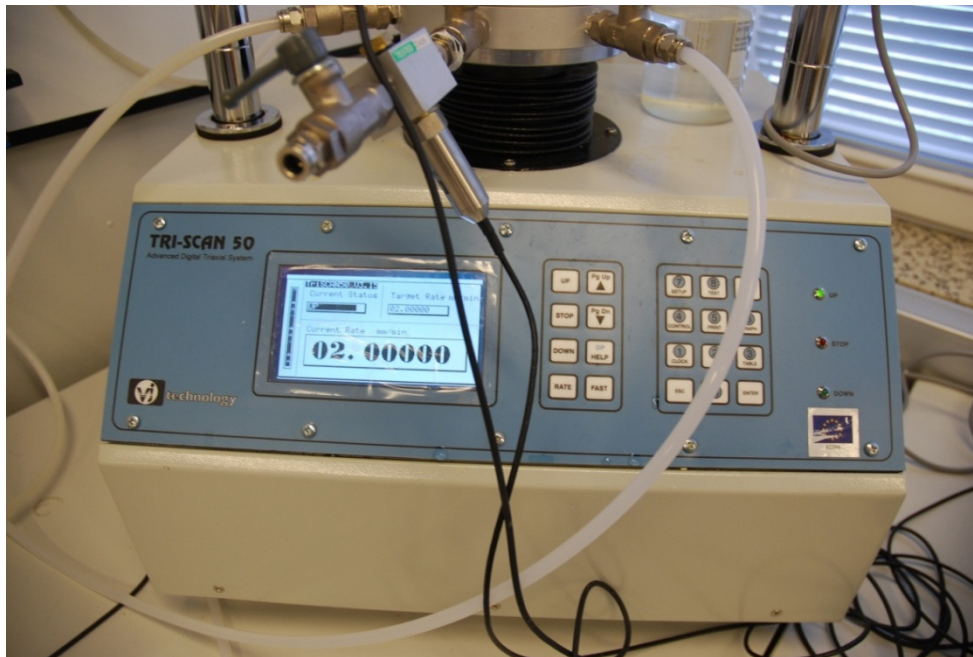
HUOM! Käsittele näytettä varovasti jottei se vaurioidu.

6. Näyte punnitaan ja sen tarkka korkeus mitataan työntömitalla. Tämän jälkeen näyte laitetaan astian päälle ja suljetaan muovipussiin.

LIITE 2

Laitteiston säätöyksikön käyttöohje

Laitteiston säätöyksiköllä ohjataan näytenpöytää pystysuorassa suunnassa. Sen avulla kuormitetaan näytettä aksiaalisesti.



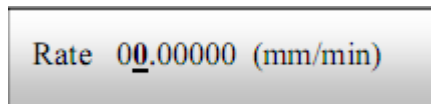
Kuva 1. Säätöyksikkö



Kuva 2. Säätöyksikön etupaneeli

1 Nopeuden säätö

Nopeutta voidaan säätää painamalla aluksi rate nappia. Tällöin avautuu nopeuden säätö ruutu (kuva 3). Painamalla OK päästään säätämään nopeutta (mm/min). Nopeuden arvo syötetään ruutuun ja painetaan uudestaan OK. Painamalla ESC päästään takaisin päänäyttöön.

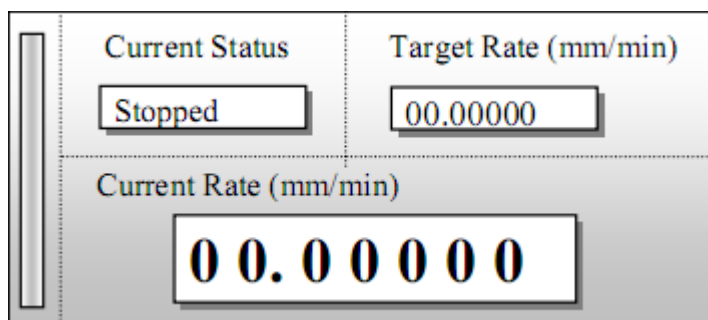


Kuva 3. Nopeuden säätö

2 Näytön tila

Current status (kuva 4.) näyttää laitteen tilan, ja se voi olla:

- **Stopped**, jolloin laite on pysähdyksissä
- **Up**, jolloin laite liikkuu ylöspäin
- **Down**, jolloin laite liikkuu alaspäin
- **Fast Up**, jolloin laite liikkuu ylöspäin täydellä nopeudella
- **Fast down**, jolloin laite liikkuu alaspäin täydellä nopeudella
- **Limit Up**, jolloin laite on yläasennossa
- **Limit Down**, jolloin laite on ala-asennossa.



Kuva 4. Säätyöyksikön näyttö perustilassa

3 Laitteen ajo

HUOM! Ennen laitteen käyttöä ja kokeen aloittamista on aina varmistettava, että laitteisto on pysähdyksissä (current status kohdassa näkyy stopped tila) (kuva 4.).

Painamalla säätöyksikön etupaneelin (kuva 2.) nappia Up, alkaa laite liikkua ylöspäin ja se alkaa kuormittaa näytettä aksiaalisesti. Vastaavasti Down komennolla laite liikkuu alaspäin. Jos kokeen päätyttyä halutaan näytepöytää ajaa nopeasti alas, onnistuu se painamalla ensin down ja tämän jälkeen fast ja enter. Vastaavasti voidaan näytepöytää ajaa nopeasti ylöspäin. Stop komennolla laite voidaan pysäyttää haluttuun asentoon.

LIITE 3

SULJETUN KOLMIAKSIAALIKOKEEN KÄYTTÖOHJEET

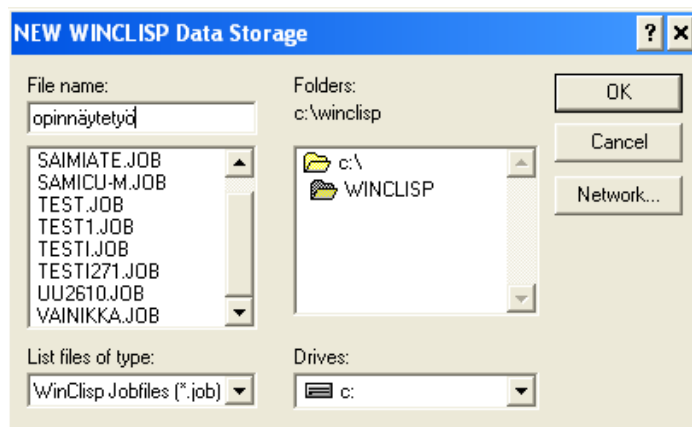
1 Lähtötietojen syöttö tietokoneelle

Winclips -ohjelma käynnistetään työpöydän pikakuvakkeesta.

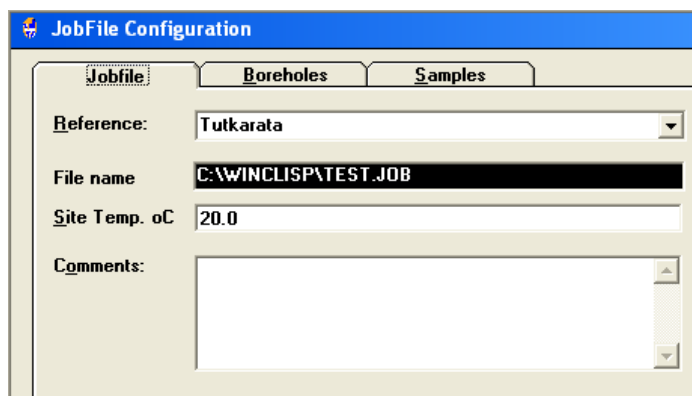


1.1 Työkansion luominen

Ensimmäiseksi määritetään työkansio. Ohjelman ylävalikosta valitaan Files ja avautuvasta valikosta New Jobfile (kuva 1.1). Työkansion nimi kirjoitetaan ja painetaan OK. Tällöin avautuu Jobfile Configuration -ikkuna (kuva 1.2).

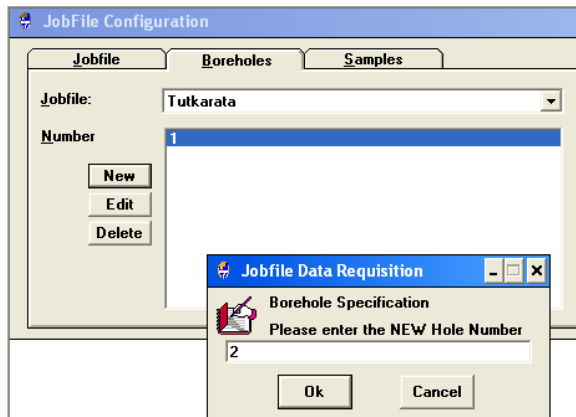


Kuva 1.1 New Jobfile



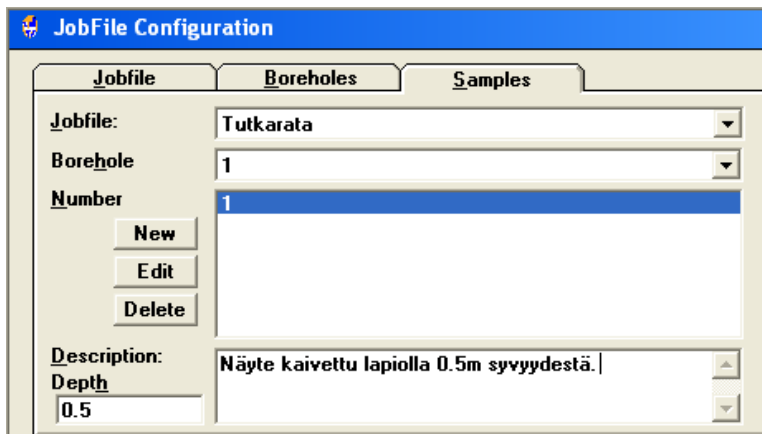
Kuva 1.2 Jobfile Configuration

Jobfile -ikkunan ylälehdien Reference -kohtaan syötetään projektin nimi (kuva 1.2). Toisessa välilehdessä (Boreholes) voidaan määrittää näytepisteet, joista näytteet ovat otettu. Näytepisteet voidaan syöttää painamalla New ja kirjoittamalla pisteen numero (kuva 1.3).



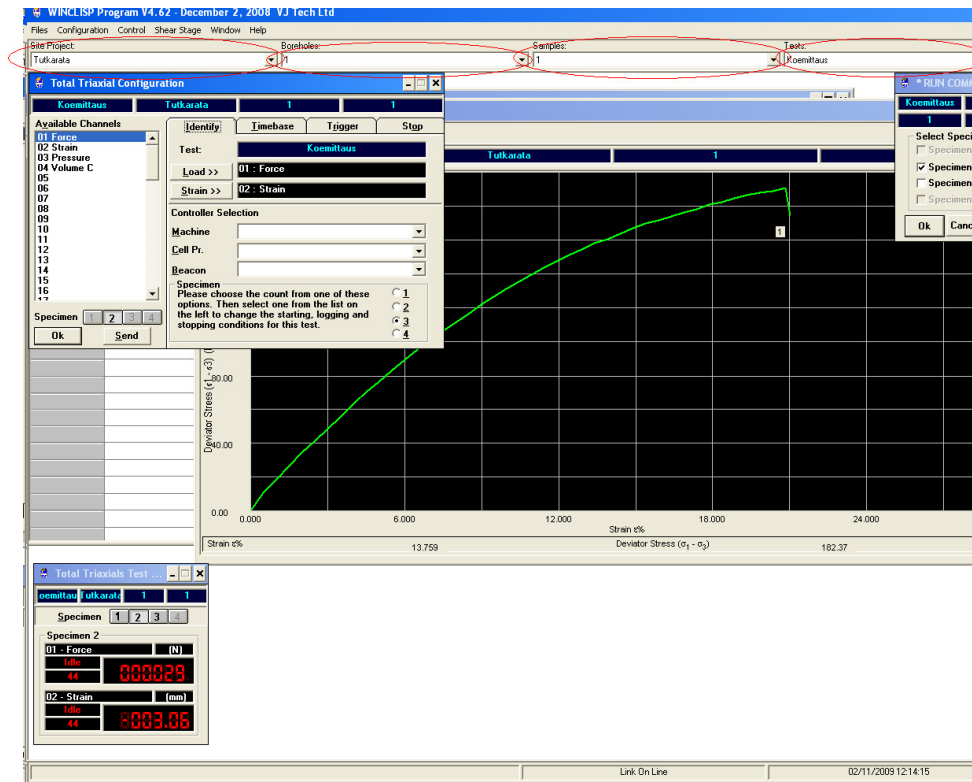
Kuva 1.3. Boreholes

Samples -ylälehdien kohdassa voidaan syöttää näytepisteistä otettujen näytteiden tiedot painamalla New. Näytteen syvyys kirjoitetaan kohtaan Depth (kuva 1.4).



Kuva 1.4. Samples

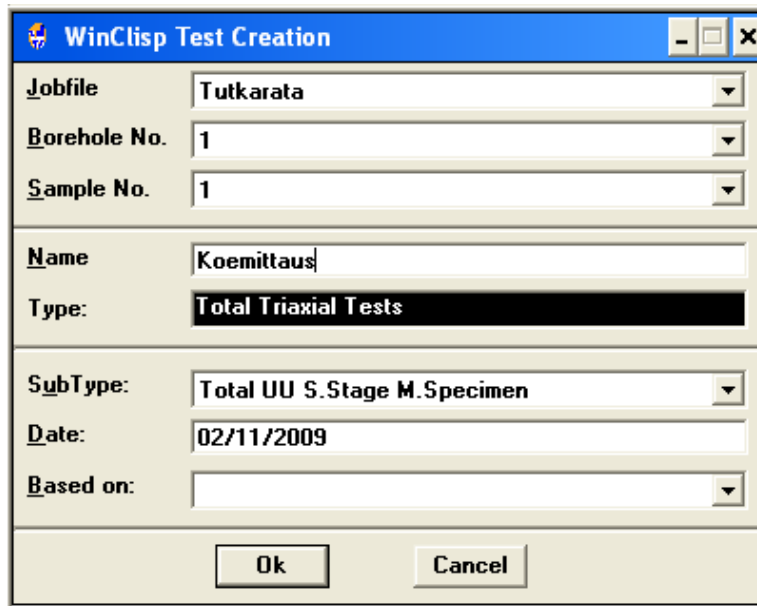
Projektin tiedot ovat nyt näkyvissä ohjelman yläreunassa valikkojen alapuolella. Site Projekt -kohdassa voidaan siirtyä projektista toiseen. Boreholes -kohdassa voidaan valita näytepisteen ja Samples -kohdassa näytteen numerot (kuva 1.5).



Kuva 1.5. Ohjelman yläreunan valikot

1.2 Kokeen tietojen määrittäminen

Kokeen tietojen antamista varten avataan ohjelman ylävalikosta Configuration ja avautuvasta valikosta New Test. Valitaan Total Triaxial Test, joka on toinen nimitys suljetulle kolmiaksisiaalikokeelle (UU-kokeelle). Kohtaan Sub Type valitaan Total UU S.Stage M.Specimen. Tämä tarkoittaa, että koe tehdään useammalla näytteellä (3-4 näytettä). Halutessasi voit valita M.Stage S.Specimen, joka tarkoittaa koetta yhdellä näytteellä (kuva 1.6).

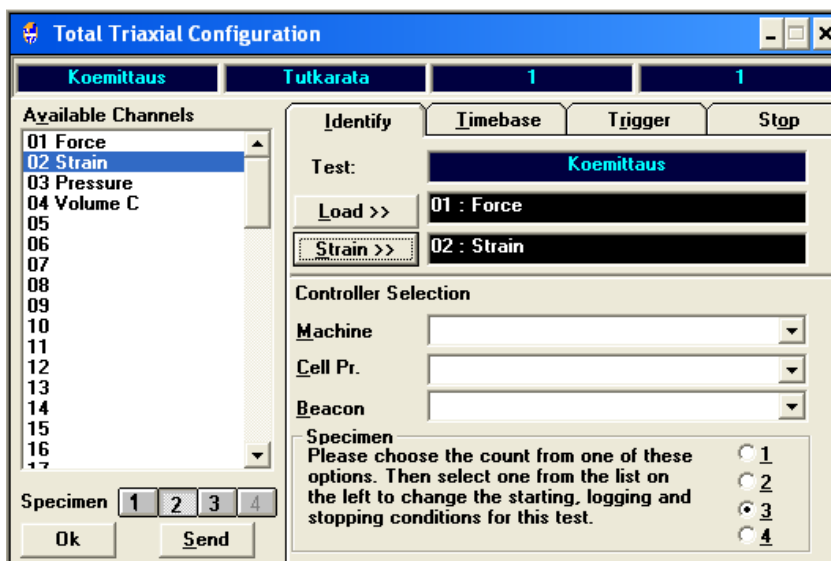


The WinClisp Test Creation dialog box contains the following fields and controls:

- Jobfile:** Tutkarata
- Borehole No.:** 1
- Sample No.:** 1
- Name:** Koemittaus
- Type:** Total Triaxial Tests
- SubType:** Total UU S.Stage M.Specimen
- Date:** 02/11/2009
- Based on:** (empty dropdown)
- Buttons:** Ok, Cancel

Kuva 1.6 Test Creation

Lopuksi painetaan OK. Tällöin avautuu Total Triaxia Configuration -ikkuna (kuva 1.7).



The Total Triaxial Configuration dialog box, Identify tab, contains the following elements:

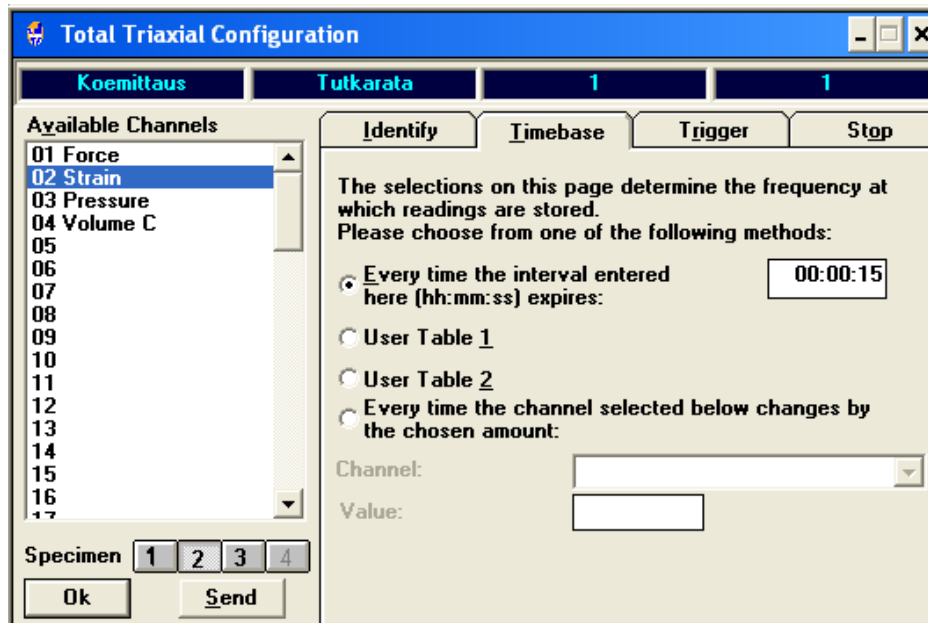
- Header:** Koemittaus, Tutkarata, 1, 1
- Available Channels:**
 - 01 Force
 - 02 Strain
 - 03 Pressure
 - 04 Volume C
 - 05
 - 06
 - 07
 - 08
 - 09
 - 10
 - 11
 - 12
 - 13
 - 14
 - 15
 - 16
 - 17
- Test:** Koemittaus
- Load >>:** 01 : Force
- Strain >>:** 02 : Strain
- Controller Selection:**
 - Machine:** (empty dropdown)
 - Cell Pr.:** (empty dropdown)
 - Beacon:** (empty dropdown)
- Specimen:**
 - Please choose the count from one of these options. Then select one from the list on the left to change the starting, logging and stopping conditions for this test.
 - Options: 1, 2, 3, 4
- Buttons:** Ok, Send

Kuva 1.7 Total Triaxial Configuration, Identify -välilehti

Ensimmäiseksi Total Triaxia Configuration -valikosta valitaan Identify -ylälehdhen Specimen -kohdasta suoritettavien kokeiden määrä 1 - 4 (SM-kokeessa yleensä 3). Identify -ylälehdessä ladataan myös voiman ja painuman kanavat, joiden tiedot tallentuvat tallenninyksikköön. Available Channels -kohdasta valitaan 01 Force aktiiviseksi ja painetaan Load. Tämän jälkeen puolestaan valitaan 02

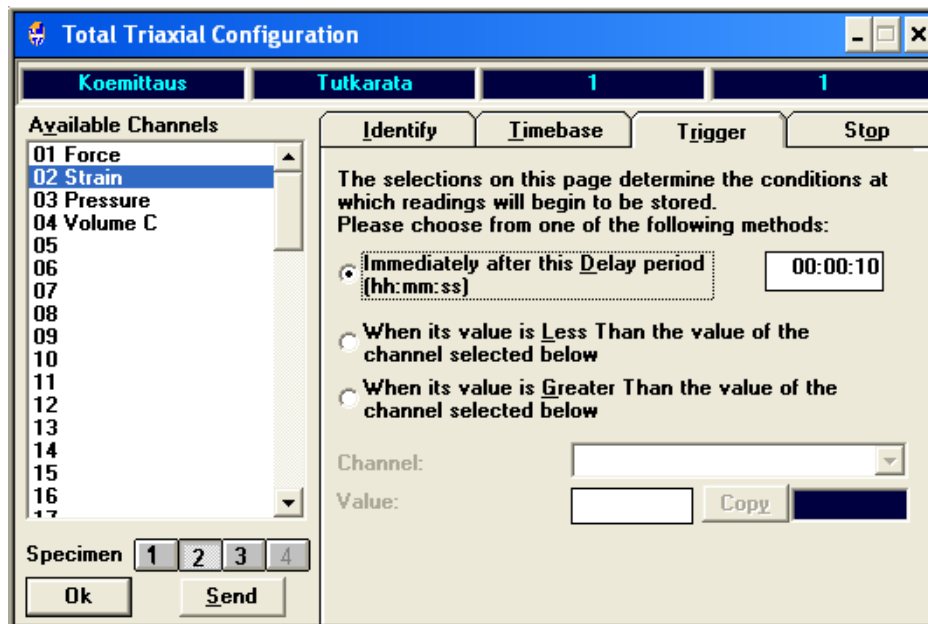
Strain aktiiviseksi ja painetaan Strain (kuva 1.7).

Timebase -välilehdestä määritetään aikaväli, jolloin lukemat tallentuvat järjestelmään. Suljetussa kokeessa käytetään yleensä 15 sekunnin aikaväliä (kuva 1.8).



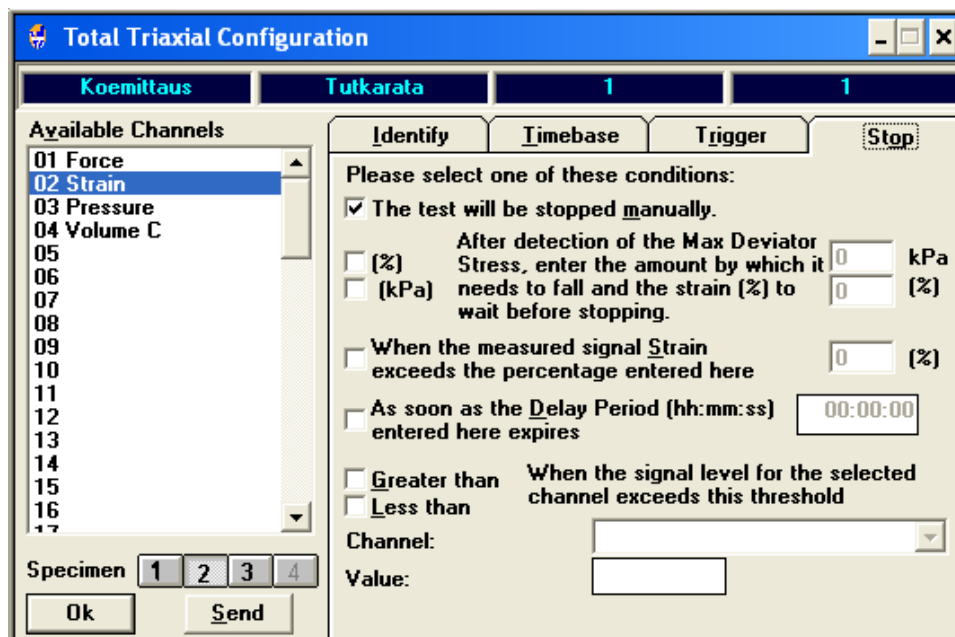
Kuva 1.8 Timebase -välilehti

Trigger -välilehdestä määritetään siirtymäaika, jolloin koe alkaa (kuva 1.9).



Kuva 1.9 Trigger -välilehti

Stop -välilehdestä määritetään miten koe halutaan lopettaa. Manuaalinen pysäytys on käytetyin ja suositeltavin tapa.



Kuva 1.10 Stop -välilehti

Jokaiselle koevaiheelle annetaan täysin samat arvot. Näytteestä toiseen voidaan siirtyä painamalla vasemmasta alakulmasta Specimen -kohdasta 1, 2 tai 3.

Lopuksi painetaan Send, jolloin ohjelma lähettää tiedot Loggeriin. Tämän jälkeen painetaan OK (kuva 1.10).

1.3 Näytteen lähtötietojen syöttö

Seuraavaksi määritellään näytteen lähtötiedot. Valitaan Shear Stage -valikosta Initial Conditions. Kaikille näytteille määritetään omat arvot. Näytteestä toiseen voidaan siirtyä valitsemalla vasemmasta alakulmasta Specimen -kohdasta näytteen numero1, 2 tai 3 (kuva 1.11). Specimen Details -ylälehdessä kirjoitetaan näytteen korkeus, halkaisija ja paino. Particle Density -kohdassa voidaan syöttää mitattu (measured) tai oletettu arvo (assumed) (kuva 1.11).

Kuva 1.11 Initial Conditions, Specimen Details

Moisture Content -ylälehden kohdassa määritetään näytteen vesipitoisuus. Näytteen paino syötetään Wet Weight -kohtaan. Jos näytteestä tiedetään vesipitoisuus, niin kuivapaino kohtaan (Dry Weight) annetaan sellainen arvo, jolla vesipitoisuus kohtaan (Moisture Content w%) tulee näytteen mitattu vesipitoisuus. Ohjelma laskee automaattisesti vesipitoisuuden, kuiva -ainepitoisuuden (Dry Density), (Voids Ratio) ja kyllästymisasteen (Deg of Saturation S%) arvot märkä- ja kuivapainon arvojen mukaan (kuva 1.12).

The screenshot shows the 'Total Triaxial Initial Conditions' dialog box with the 'Moisture Content' tab selected. The dialog has a blue title bar and a tabbed interface with 'Koemittaus', 'Tutkarata', and 'Conditions'. The 'Moisture Content' tab contains the following fields:

Wet Weight + Tare (g)	379.0	Dry Density ρ_d (Mg/m ³)	1.49
Dry Weight + Tare (g)	295.0	Voids Ratio e	0.781
Tare Weight (g)	0.0	Deg of Saturation $S\%$	96.6
Moisture Content $w\%$	28		

At the bottom, there is a 'Specimen' section with buttons 1, 2, 3, and 4, and 'Ok' and 'Cancel' buttons.

Kuva 1.12 Initial Conditions, Moisture Content

Tämän jälkeen määritellään näytteiden olosuhteet kokeessa (Conditions). Cell Preassure -kohdassa määritetään sellipaine, Machine Speed -kohdassa nopeus, No. of Membranes kohdassa kumiin lukumäärä ja Total Thickness -kohdassa kumiin paksuus (kuva 1.13).

The screenshot shows the 'Total Triaxial Initial Conditions' dialog box with the 'Conditions' tab selected. The dialog has a blue title bar and a tabbed interface with 'Koemittaus', 'Tutkarata', and 'Conditions'. The 'Conditions' tab contains the following fields:

Cell Pressure σ_3 (kPa)	50
Machine Speed d_r (mm/min)	2.000
No. of Membranes	1
Total Thickness (mm)	0.2

At the bottom, there is a 'Specimen' section with buttons 1, 2, 3, and 4, and 'Ok' and 'Cancel' buttons.

Kuva 1.13 Initial Conditions, Conditions

Kun kaikki näytetiedot on määritetty, painetaan OK.

2 Näytteen asettaminen selliin ja laitteiston valmistelu koetta varten

1. Näyte asetetaan muovialustan päälle laitteeseen. Näytteen yläpäähän asetetaan suodatinpaperi.
2. Membraani -kumi asennetaan asennusholkkiin ja imetään alipaineella (kuva 2.1).



Kuva 2.1 Membraani-kumin imeminen

3. Asennusholkki ja membraani -kumi laitetaan näytteen ympärille, kumi vapautetaan paineesta ja vedetään asennusholkista näytteen päälle. Kumin tulee olla näytteen alapuolelle alahatun päällä. Ylähattua ei vielä aseteta kumin sisään (kuva 2.2).

HUOM! Käsittele näytettä aina varovasti!



Kuva 2.2 Membraani -kumin asentaminen näytteen ympärille

4. Asennusholkki poistetaan.
5. O-renkaat pujotetaan ylähatun läpi takapaineletkulle.
6. Ylähattu asennetaan kumin sisään näytteen päälle (kuva 2.3).



Kuva 2.3 Ylähatun asentaminen kumin sisälle

7. O-renkaat asennetaan ylä- ja alahattuun käyttäen apuna messinkiholkkia (kuvat 2.4 ja 2.5).



Kuva 2.4 O-renkaiden asennus



Kuva 2.5 O-renkaiden asennus

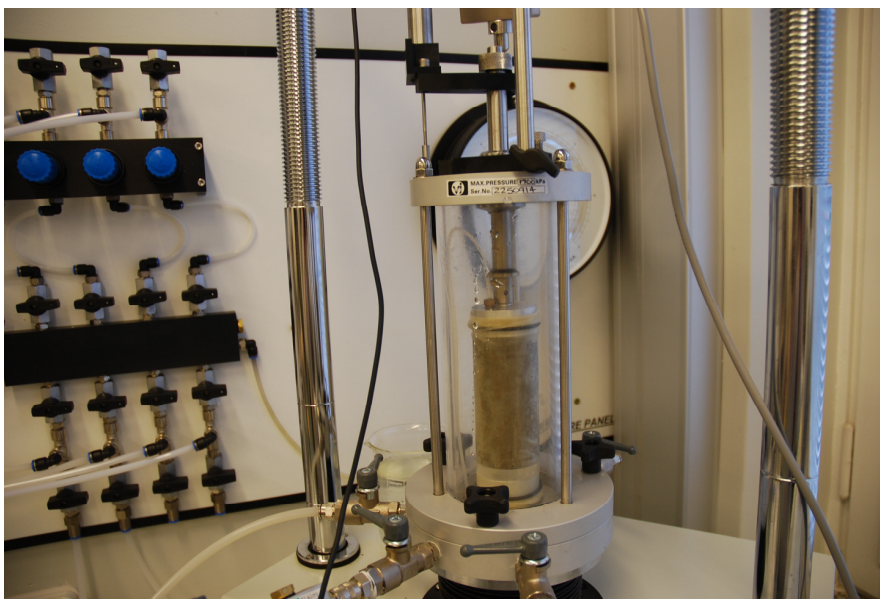
8. Yläpuolen ylimääräinen suojakumi käännetään O-renkaiden päälle.

9. Käännä kuormitusanturi taaksepäin, jotta selli saadaan asennettua paikoilleen (kuva 2.6).



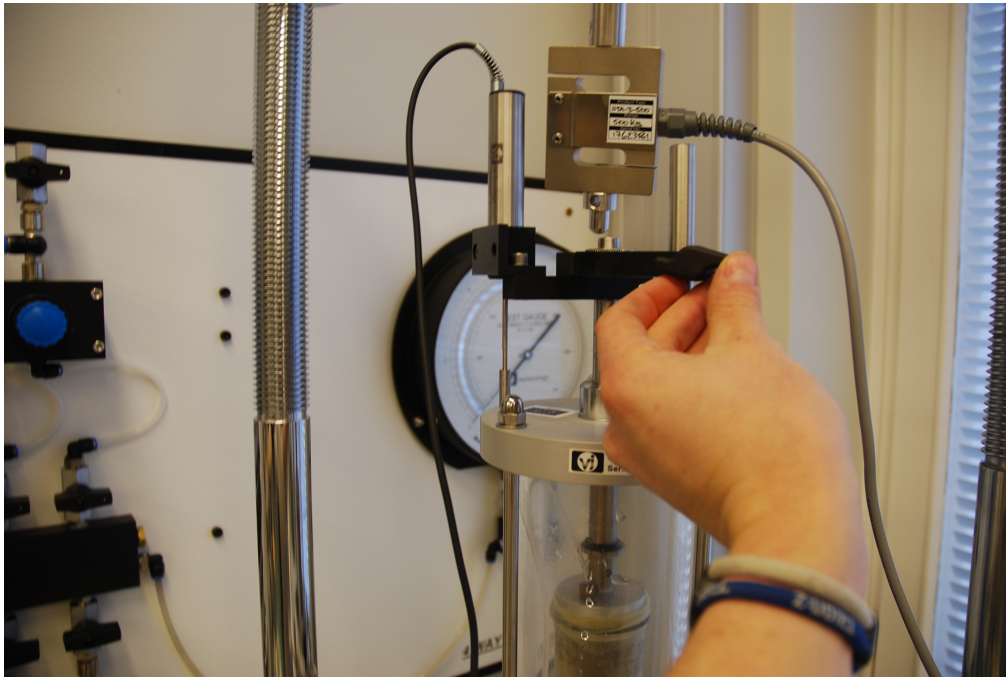
Kuva 2.6 Näytesellin asennus

10. Näyteselli asennetaan näytteen päälle ja se lukitaan (kuva 2.6).
HUOM! Tarkista, että pystypainemäntä on näytteen ylähatun kanssa samassa linjassa.



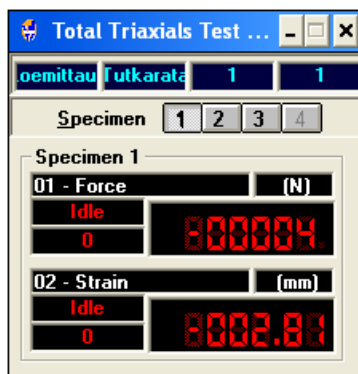
Kuva 2.7 Näyte sellissä

11. Pystypainemäntä lukitaan kiinnikkeellä kiinni näytteen ylähattuun (kuva 2.8).
HUOM! Näytettä ei kuormiteta, vaan lasketaan mäntä herkästi kiinni ylähattuun.



Kuva 2.9 Männän lukitseminen

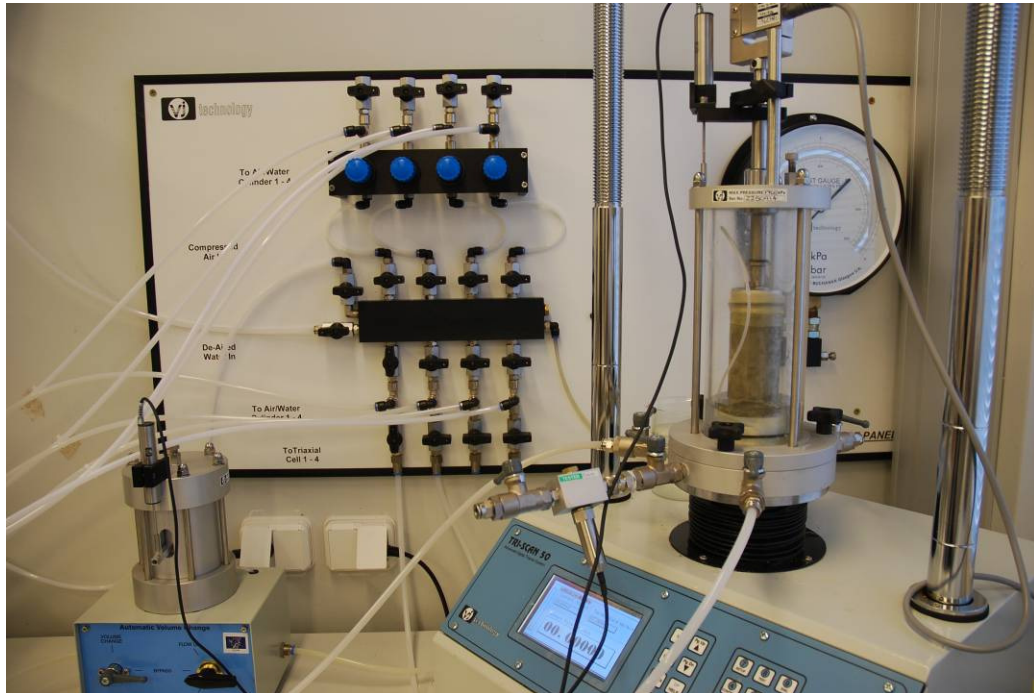
12. Control Overview -ikkunasta oleva painuman (strain) arvo kirjataan tässä vaiheessa ylös.



Kuva 2.10 Control Overview - ikkuna

13. Tässä vaiheessa voidaan kuormitusanturi kääntää takaisin pystysuoraan asentoon.

14. Näyteselli täytetään vedellä avaamalla vesiventtiili ja sellipainelijan venttiilit 1, 2 ja 3 (kuva 2.12). Lisäksi ilmausruuvi avataan näytesellin päältä ennen veden laskemista. Sellin vesiventtiili avataan ja vettä alkaa virrata selliin. Kun sellin ilmausruuvista tulee vettä, sellin vesiventtiili suljetaan ja ilmaruuvi kierretään kiinni. Jos sellin yläosaan jää vielä ilmaa, avataan sellin vesiventtiiliä ja ilmausruuvia hieman ja heilutetaan selliä varovasti.



Kuva 2.11 Laitteisto ennen veden lisäämistä

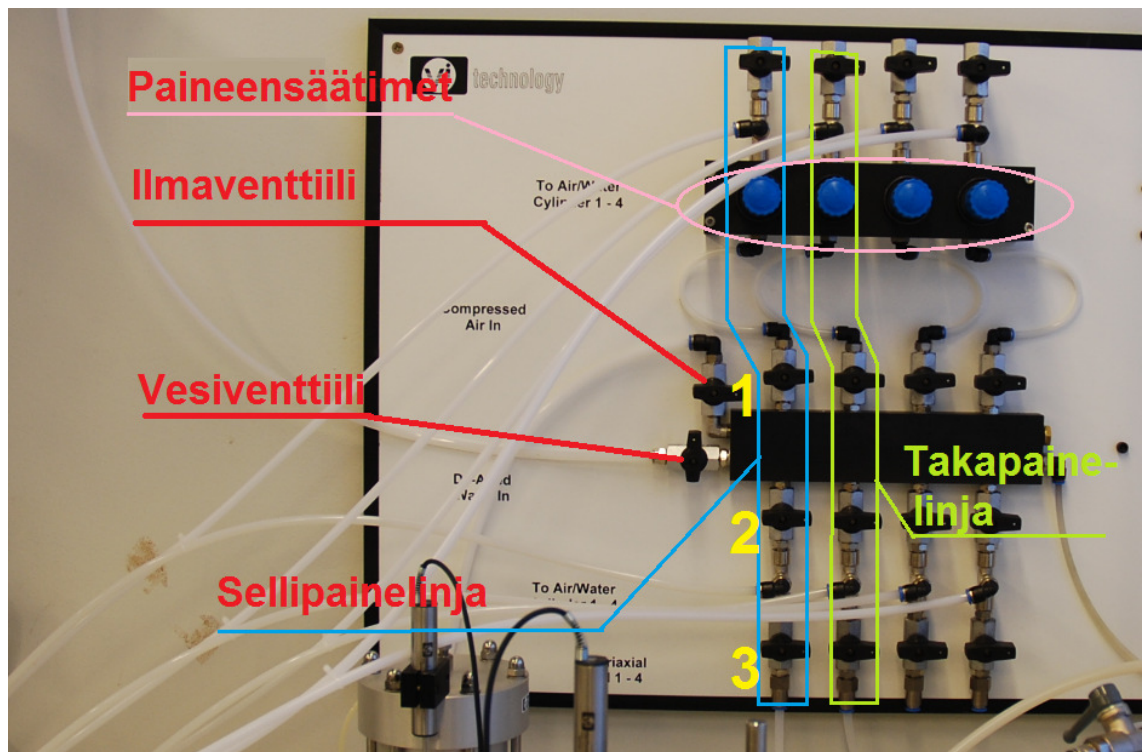
15. Vesiventtiili suljetaan jakotukista.

16. Näytepöytää ajetaan ylöspäin, kunnes kuormitusanturi alkaa hieman ottaa kuormaa vastaan (Force - arvo Control Overview -ikkunassa alkaa kasvaa). Painuma-arvo (strain) tulisi olla likimäärin sama kuin vaiheessa 12.

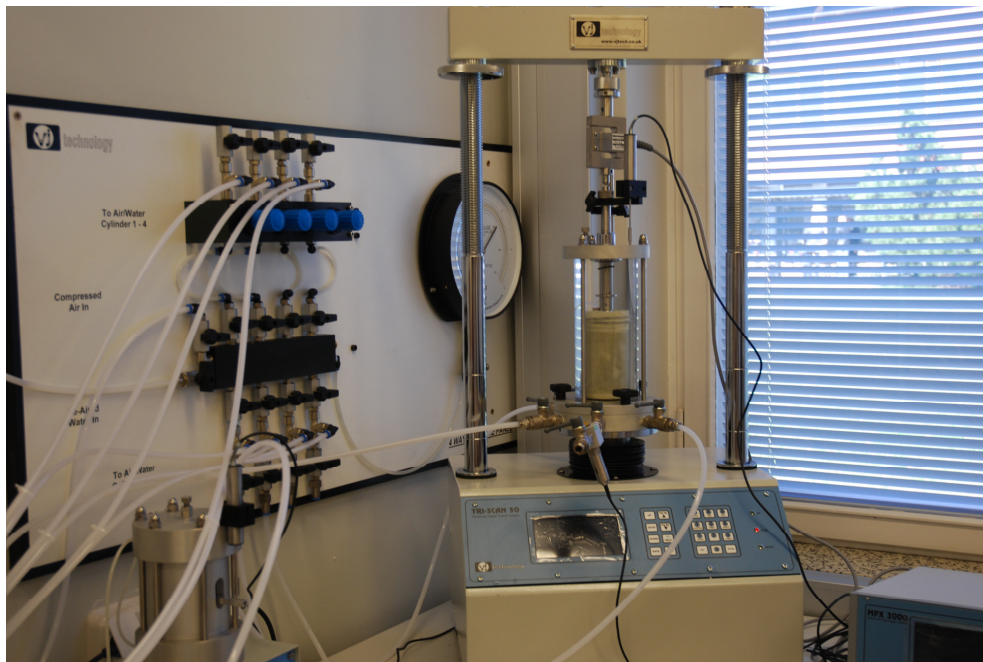
HUOM! Mäntä tulee olla hyvin kiinni näytteen ylähatussa, jotta kuormitusluemat ovat todenmukaisia kokeen alusta lähtien.

17. Haluttu painetaso asetetaan kammioon. Ensin varmistetaan, että kammion vesiventtiili on kiinni. Paineilman tuloventtiili aukaistaan jakotukista ja varmistetaan, että sellipainelinjan venttiilit 1, 2 ja 3 ovat aukiasennossa. Haluttu paine säädetään sellipainelinjan paineensäätimestä kääntämällä säädintä myötäpäivään. Painetasoa seurataan taulun oikealla puolella olevasta mittarista.

18. Kun oikea paine on säädetty, venttiili 2 suljetaan ja paine vapautetaan kammioon avaamalla kammion vesiventtiili.



Kuva 2.12 Paineensäätöyksikkö, kaikki venttiilit kiinni



Kuva 2.13 Laitteisto ennen kokeen aloittamista

19.HUOM! Varmista vielä, että mitta-anturissa iskunpituus on riittävä. Iskunpituus pitää olla vähintään 25 mm. Ilman riittävää iskunpituutta mitta-anturi voi rikkoutua kokeen aikana.

20. Koe voidaan aloittaa.

3 Kokeen suorittaminen

Kun kaikki lähtötiedot on annettu ja laitteisto on asetettu toimintavalmiuteen, voidaan koe aloittaa.

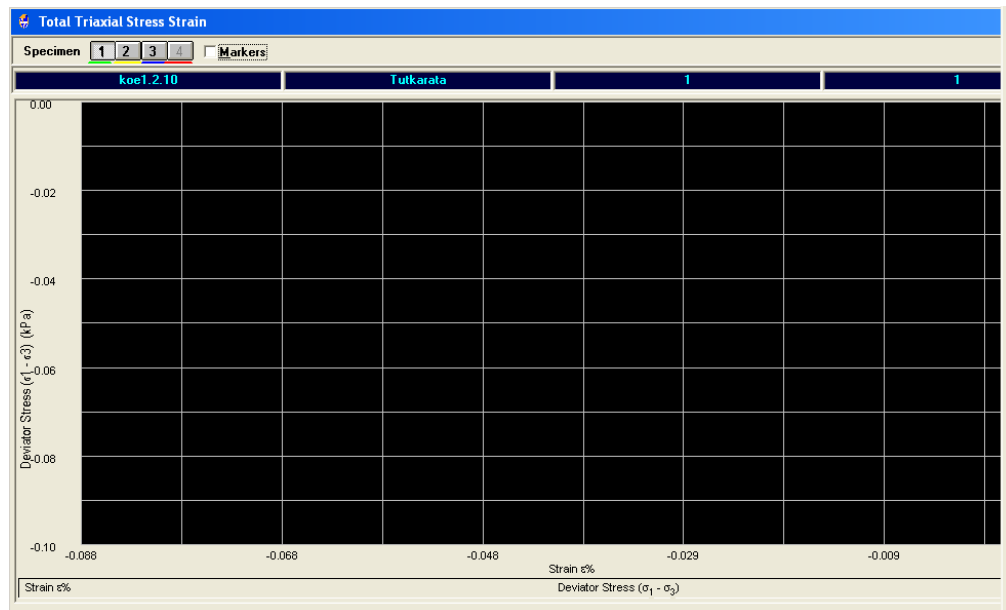
1. Sääda laitteistoista oikea nopeus (liite 2).
2. Avaa Shear Stage -valikosta Data Entry -ikkuna.

Ikkunaan tulee arvot jokaisesta mittauksesta taulukkomuodossa. Strain (mm) -kohdasta seurataan painuman arvoa. Painuma ei saa ylittää 20% kokoonpuristuvuutta (20 mm jos näyte on 100 mm korkea).

[illegible]

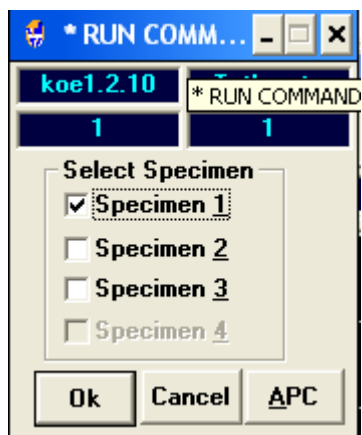
Kuva 3.1 Data Entry kokeen alussa

3. Stress–Strain -ikkuna avataan myös. Kuvaajassa näkyy x-akselilla painuman arvo ja y-akselilla jännityksen arvo (σ_1 - σ_3) (kuva 3.2).



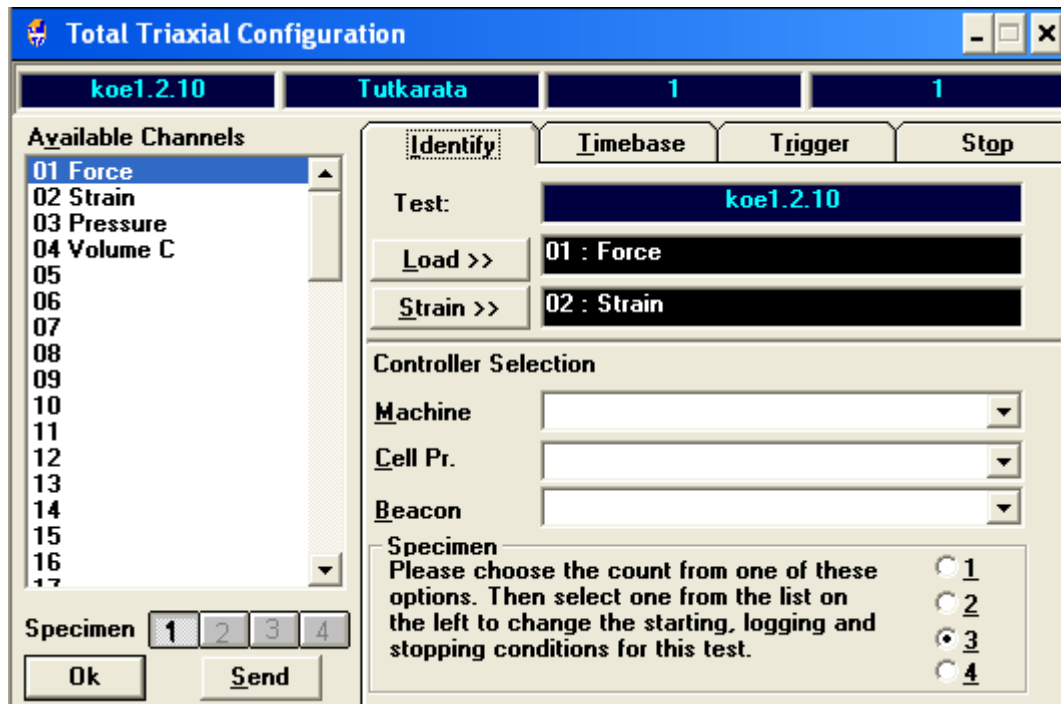
Kuva 3.2 Stress–Strain kokeen alussa

4. Koe käynnistetään painamalla Control valikosta Run. Tällöin ilmestyneestä ikkunasta valitaan käytetty näyte ja painetaan OK (kuva 3.3).



Kuva 3.3 Run Command

5. Avautuneesta Test Configuratin ikkunasta voidaan vielä varmistaa, että kokeen asetukset ovat asianmukaiset.



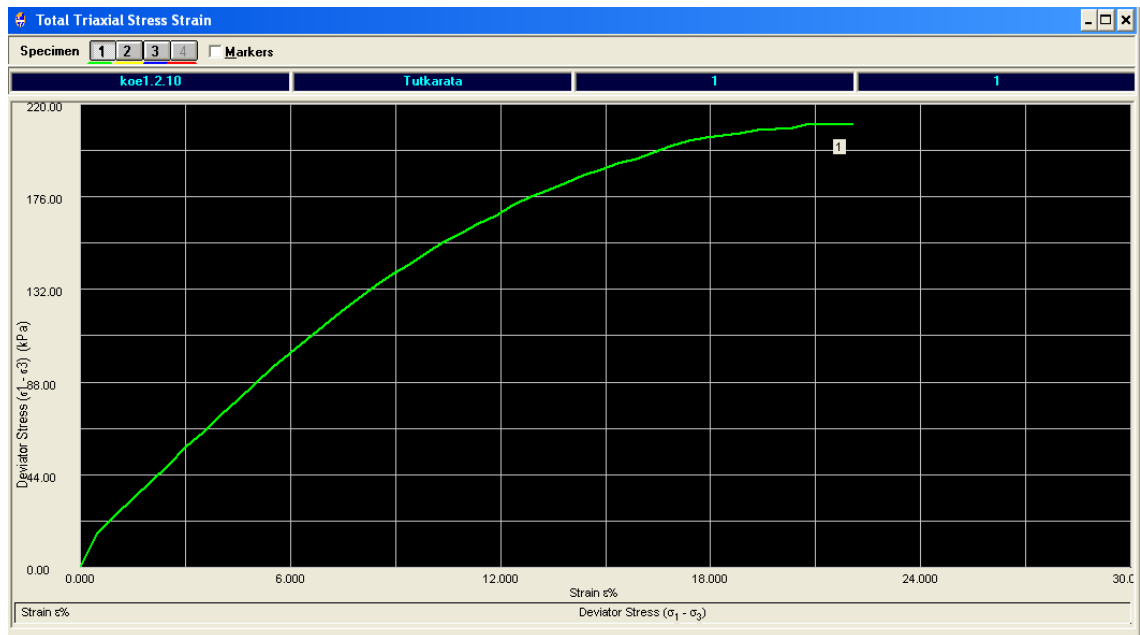
Kuva 3.4 Test Configuration

6. Lopuksi painetaan OK ja koe alkaa. Control Overview -ikkuna muuttuu keltaiseksi. Laitteen säätöyksiköstä painetaan up painiketta ennen kuin Control Overview -ikkuna muuttuu vihreäksi.

7. Stress–Strain -kuvaajaa seurataan kokeen edetessä. Se näyttää painuman (%) ja jännityksen σ_1 - σ_3 (kPa) arvot .

Kun jännitys ei enää kasva, vaan kääntyy laskuun, niin näyte on leikkaantunut. Tällöin koe lopetetaan. Jos leikkausta ei tapahdu, niin koe lopetetaan, kun 20% näytteen pituudesta on kokoonpuristunut (20 mm jos näyte on 100 mm pitkä) (kuva 3.5).

Koe lopetetaan painamalla Control Stop. Tämän jälkeen pysäytetään laitteen säätöyksikkö (liite 2).



Kuva 3.5 Stress – Strain ensimmäisen kuormituksen lopussa

8. Kokeen päätyttyä avataan Shear Stage -valikosta Final Conditions -ikkuna. Siihen syötetään näytteen arvot (kuva 3.6).

The 'Total Triaxial Final Conditions' dialog box is used to input specimen data. It features tabs for 'Moisture Content', 'Results', and 'Notes'. The 'Moisture Content' tab is active, showing input fields for 'Wet Weight + Tare (g)', 'Dry Weight + Tare (g)', 'Tare Weight (g)', and 'Moisture Content w%'. To the right, calculated values for 'Dry Density ρ_d (Mg/m³)', 'Voids Ratio e', and 'Deg of Saturation S%' are displayed. At the bottom, there are buttons for 'AGS', 'Ok', and 'Cancel', along with a 'Specimen' selector showing '1'.

Parameter	Value
Wet Weight + Tare (g)	391.5
Dry Weight + Tare (g)	305.0
Tare Weight (g)	0.0
Moisture Content w%	28
Dry Density ρ_d (Mg/m ³)	1.55
Voids Ratio e	0.706
Deg of Saturation S%	100.0

Kuva 3.6 Final Conditions

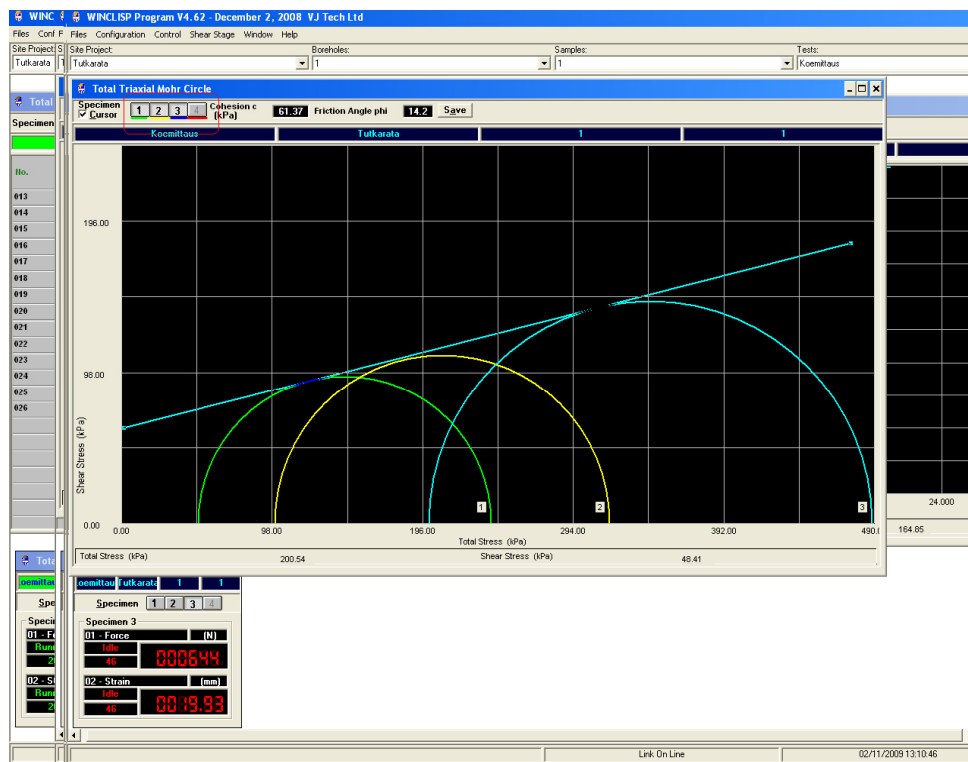
9. Ennen seuraavan näytteen kuormittamista, on Control valikosta painettava Download, jotta tiedot latautuvat Loggerista.
10. Muut kokeet suoritetaan samalla tavalla.

4 Kokeen lopettaminen

1. Ensimmäiseksi poistetaan paineet kammiosta. Paineilmaventtiili suljetaan ja sellipainelinjan 2. venttiili avataan. Venttiilit 1. ja 3. pidetään auki. Tämän jälkeen sellipainelinjan painesäädintä kierretään vastapäivään ja paineet poistuvat.
2. Kaikki venttiilit suljetaan, kun painemittari näyttää nollaa.
3. Kun paineet on poistettu, näytepöytä voidaan laskea alas painamalla Down Fast (liite 2).
4. Vedet poistetaan sellistä avaamalla ensimmäiseksi ilmaruuvi ja tämän jälkeen tyhjennysventtiili.
5. Tämän jälkeen selli voidaan irrottaa ja poistaa näyte laitteesta.

5 Kokeen tulosten määrittäminen

1. Kun kaikki kuormitukset on suoritettu, avataan Shear Stage -valikosta Mohr Circles. Kaikki kolme kuormitusta valitaan aktiiviseksi ikkunan vasemmasta ylä-laidasta, jolloin kokeiden perusteella saadut ympyrät tulevat näkyviin.

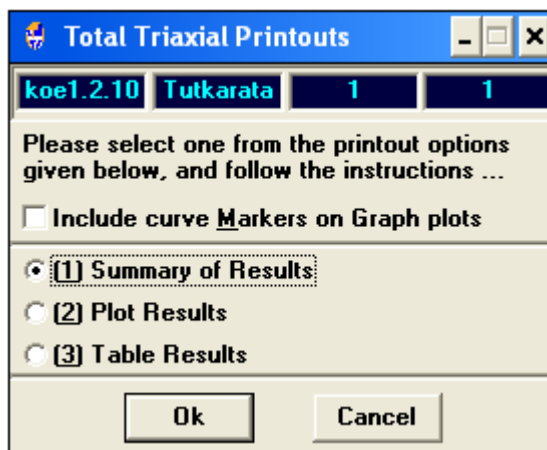


Kuva 5.1 Mohrin ympyrät ja sovitekäyrä

2. Tämän jälkeen määritetään sovitekäyrä. Ikkunan yläreunasta painetaan Specimen Cursor aktiiviseksi ja käyrä sovitetään ympyröiden tangenttien mukaan.
3. Tangentin ja y-akselin leikkauskohtaan muodostuu maalajin koheesion arvo. Tangentin kulmakerroin puolestaan kuvaa maalajin kitkakulmaa. Arvot ovat nähtävissä ikkunan yläreunassa (Cohesion c ja Friction Angle). Kun käyrä on sovitettu, tallennetaan arvot painamalla yläreunan Save - painiketta. Tämän jälkeen avataan Shear Stage -valikosta Final Conditions -ikkuna. Siihen Notes -välilehteen tallennetaan koheesion ja kitkakulman arvot.

6 Kokeen tulosten tulostaminen

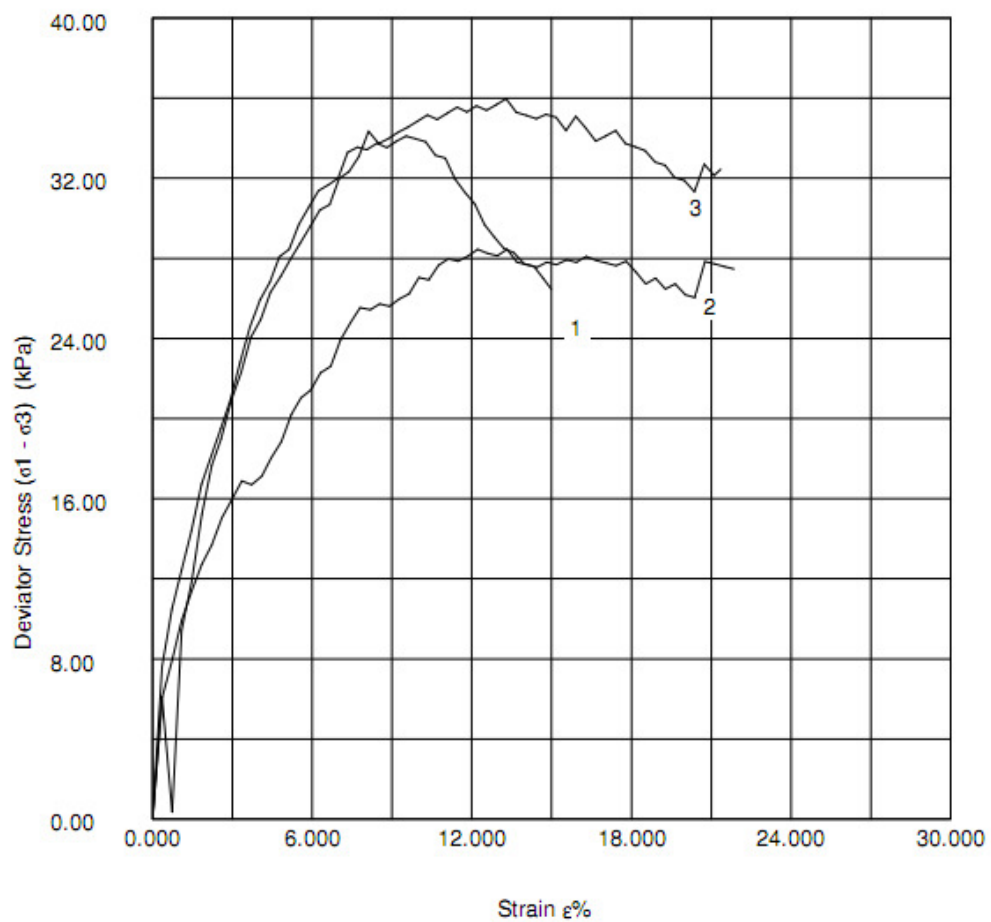
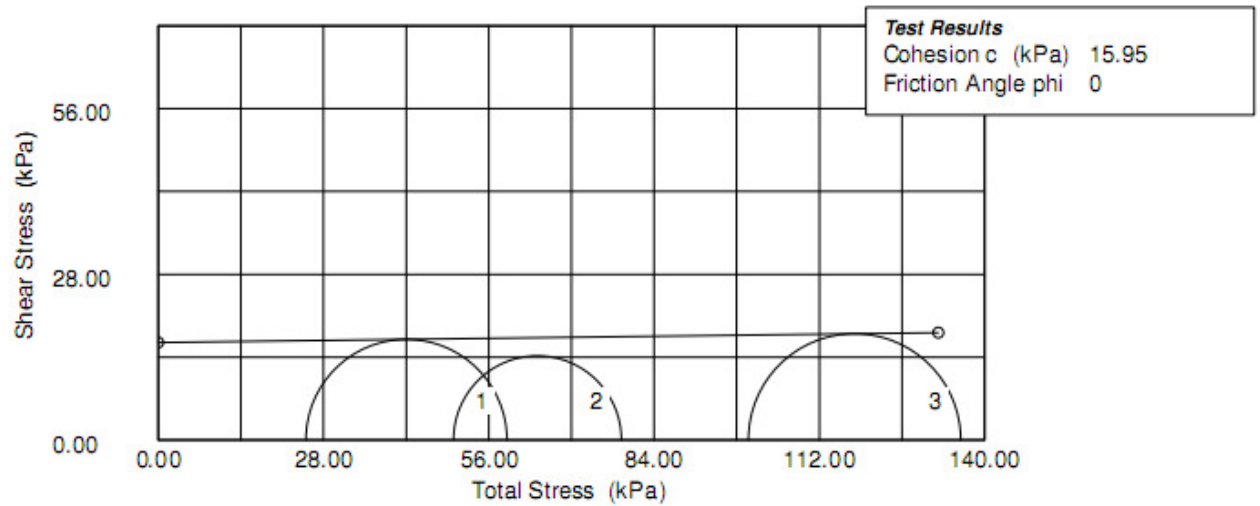
Kokeen tulokset voidaan tulostaa painamalla Files -valikosta Print. Avautuneesta ikkunasta voidaan valita Summary of Results, Plot Results tai Table Results (kuva 6.). Summary of Results kertoo kokeen perustiedot ja arvot. Plot Results tuo näkyviin puolestaan Mohrin ympyrät ja sovitekäyrän sekä jännityskuvaajan (lopullisen tilan Stres-Strain kuvaajasta, jossa jokainen kuormitustilanne on näkyvissä). Table Results -valikosta saadaan tulostettua yksityiskohtaiset tiedot jokaisen kuormituksen jokaisesta mittauspisteestä (Data Entry -taulukon lopullinen tilanne). On suositeltavaa tulostaa kaikki kolme vaihtoehtoa aina.



Kuva 6. Tulostus

LIITE 4

Suljetun kolmiaksaalikokeen tulokset 15.03.1010



Sample details

Sketch showing specimen location in original Sample



Depth 4m
Description:

	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
Type			
Height H_0 (mm)	101	101	101
Diameter D_0 (mm)	50	50	50
Weight W_0 (gr)	362.6	364.1	357.4
Bulk Density ρ (Mg/m ³)	1.83	1.84	1.80
Particle Density ρ_s	2.65	2.65	2.65
	(assumed)	(assumed)	(assumed)

Initial Conditions

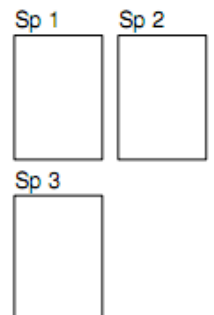
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
Cell Pressure σ_3 (kPa)	25.00	50.00	100.00
Machine Speed d_r (mm/min)	1.500	1.500	1.500
No. of Membranes	1	1	1
Total Thickness (mm)	0.2	0.2	0.2
Strain Channel	bb15-19	bb15-19	bb15-19
Load Channel	17623561	17623561	17623561
Moisture Content w_0 %	30	30	30
Dry Density ρ_{d0} (Mg/m ³)	1.41	1.41	1.39
Voids Ratio e_0	0.88	0.88	0.91
Deg of Saturation S_0 %	89.86	90.77	87.16

Final Condition

	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
Max Deviator Stress (kPa)	35.02	29.58	37.09
Membrane Correction σ_{mh} (kPa)	0.91	1.12	1.12
Corr Stress $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ (kPa)	34.11	28.45	35.97
Strain at Failure ϵ_f %	9.52	13.33	13.30
Shear Strength c_u (kPa)	17.05	14.23	17.98
Moisture Content w_f %	30	30	30
Dry Density ρ_{df} (Mg/m ³)	1.41	1.41	1.39
Voids Ratio e_f	0.88	0.88	0.91
Deg of Saturation S_f %	89.15	90.77	87.16

Notes:

Failure Sketch



Surface Inclination

Ensimmäisen kuormituksen mittaustiedot

No.	Strain (divs)	Strain (mm)	Strain ε%	Load (Divs)	Load (N)	D. Stress ($\sigma_1 - \sigma_3$) (kPa)
1	-304	-3.04	0.00	14	14	0.00
2	-268	-2.68	0.36	29	29	7.61
3	-231	-2.31	0.72	35	35	10.47
4	-193	-1.93	1.10	39	39	12.44
5	-156	-1.56	1.47	43	43	14.40
6	-118	-1.18	1.84	48	48	16.73
7	-81	-0.81	2.21	51	51	18.16
8	-45	-0.45	2.56	54	54	19.51
9	-9	-0.09	2.92	57	57	20.92
10	29	0.29	3.30	61	61	22.81
11	66	0.66	3.66	65	65	24.57
12	104	1.04	4.04	68	68	25.93
13	141	1.41	4.41	70	70	26.81
14	177	1.77	4.76	73	73	28.09
15	215	2.15	5.14	74	74	28.46
16	252	2.52	5.50	77	77	29.71
17	289	2.89	5.87	79	79	30.55
18	326	3.26	6.24	81	81	31.39
19	363	3.63	6.60	82	82	31.66
20	400	4.00	6.97	83	83	32.01
21	437	4.37	7.34	86	86	33.29
22	474	4.74	7.70	87	87	33.55
23	510	5.10	8.06	87	87	33.42
24	548	5.48	8.44	88	88	33.75
25	585	5.85	8.80	88	88	33.53
26	622	6.22	9.17	89	89	33.86
27	658	6.58	9.52	90	90	34.11
28	695	6.95	9.89	90	90	33.97
29	733	7.33	10.27	90	90	33.82
30	770	7.70	10.63	89	89	33.15
31	808	8.08	11.01	89	89	33.00
32	845	8.45	11.38	87	87	31.96
33	882	8.82	11.74	86	86	31.30
34	919	9.19	12.11	85	85	30.72
35	956	9.56	12.48	83	83	29.69
36	994	9.94	12.85	82	82	29.06
37	1031	10.31	13.22	81	81	28.49
38	1068	10.68	13.58	81	81	28.29
39	1106	11.06	13.96	80	80	27.72
40	1143	11.43	14.33	80	80	27.60
41	1180	11.80	14.69	79	79	26.99
42	1211	12.11	15.00	78	78	26.45

Toisen kuormituksen mittauksien tiedot

No.	Strain (divs)	Strain (mm)	Strain ε%	Load (Divs)	Load (N)	D. Stress (σ1 - σ3) (kPa)
1	-262	-2.62	0.00	18	18	0.00
2	-225	-2.25	0.37	30	30	6.09
3	-188	-1.88	0.73	34	34	7.94
4	-151	-1.51	1.10	38	38	9.92
5	-113	-1.13	1.48	41	41	11.39
6	-75	-0.75	1.85	44	44	12.73
7	-37	-0.37	2.23	46	46	13.68
8	1	0.01	2.60	49	49	15.04
9	39	0.39	2.98	51	51	15.96
10	77	0.77	3.36	53	53	16.89
11	114	1.14	3.72	53	53	16.71
12	152	1.52	4.10	54	54	17.13
13	189	1.89	4.47	56	56	18.03
14	227	2.27	4.84	58	58	18.85
15	265	2.65	5.22	61	61	20.22
16	302	3.02	5.58	63	63	21.03
17	339	3.39	5.95	64	64	21.43
18	376	3.76	6.32	66	66	22.29
19	414	4.14	6.69	67	67	22.60
20	451	4.51	7.06	70	70	23.93
21	489	4.89	7.44	72	72	24.77
22	526	5.26	7.80	74	74	25.54
23	564	5.64	8.18	74	74	25.43
24	600	6.00	8.53	75	75	25.72
25	637	6.37	8.90	75	75	25.61
26	674	6.74	9.27	76	76	25.97
27	712	7.12	9.64	77	77	26.24
28	749	7.49	10.01	79	79	27.05
29	787	7.87	10.39	79	79	26.93
30	824	8.24	10.75	81	81	27.65
31	861	8.61	11.12	82	82	27.98
32	898	8.98	11.49	82	82	27.86
33	935	9.35	11.85	83	83	28.12
34	972	9.72	12.22	84	84	28.44
35	1010	10.10	12.59	84	84	28.26
36	1047	10.47	12.96	84	84	28.13
37	1084	10.84	13.33	85	85	28.45
38	1121	11.21	13.69	84	84	27.81
39	1159	11.59	14.07	84	84	27.68
40	1197	11.97	14.45	84	84	27.56
41	1234	12.34	14.81	85	85	27.81
42	1272	12.72	15.19	85	85	27.69
43	1310	13.10	15.56	86	86	27.93
44	1347	13.47	15.93	86	86	27.80
45	1385	13.85	16.31	87	87	28.10
46	1423	14.23	16.68	87	87	27.90

47	1460	14.60	17.05	87	87	27.77
48	1498	14.98	17.43	87	87	27.63
49	1536	15.36	17.80	88	88	27.86
50	1573	15.73	18.17	87	87	27.31
51	1610	16.10	18.53	86	86	26.73
52	1648	16.48	18.91	87	87	27.01
53	1685	16.85	19.28	86	86	26.47
54	1722	17.22	19.64	87	87	26.72
55	1760	17.60	20.02	86	86	26.18
56	1797	17.97	20.39	86	86	26.05
57	1835	18.35	20.76	87	87	27.85
58	1872	18.72	21.13	87	87	27.72
59	1909	19.09	21.50	87	87	27.59
60	1945	19.45	21.85	87	87	27.46

Kolmannen kuormituksen mittaustiedot

No.	Strain (divs)	Strain (mm)	Strain ε%	Load (Divs)	Load (N)	D. Stress (σ1 - σ3) (kPa)
1	-131	-1.31	0.00	25	25	0.00
2	-95	-0.95	0.36	37	37	6.09
3	-57	-0.57	0.73	26	26	0.35
4	-20	-0.20	1.10	44	44	9.42
5	18	0.18	1.48	49	49	11.89
6	56	0.56	1.85	56	56	15.23
7	93	0.93	2.22	61	61	17.66
8	130	1.30	2.58	64	64	19.01
9	168	1.68	2.96	68	68	20.91
10	205	2.05	3.33	71	71	22.31
11	243	2.43	3.70	75	75	24.07
12	280	2.80	4.07	77	77	24.95
13	317	3.17	4.44	80	80	26.31
14	355	3.55	4.81	82	82	27.10
15	392	3.92	5.18	84	84	27.96
16	429	4.29	5.54	86	86	28.74
17	467	4.67	5.92	88	88	29.58
18	504	5.04	6.29	90	90	30.41
19	541	5.41	6.65	91	91	30.69
20	578	5.78	7.02	94	94	31.99
21	615	6.15	7.39	95	95	32.33
22	652	6.52	7.75	97	97	33.07
23	689	6.89	8.12	100	100	34.34
24	727	7.27	8.50	99	99	33.73
25	764	7.64	8.86	100	100	33.98

26	801	8.01	9.23	101	101	34.30
27	838	8.38	9.59	102	102	34.54
28	875	8.75	9.96	103	103	34.86
29	913	9.13	10.34	104	104	35.16
30	950	9.50	10.70	104	104	34.94
31	987	9.87	11.07	105	105	35.25
32	1025	10.25	11.45	106	106	35.54
33	1062	10.62	11.81	106	106	35.32
34	1099	10.99	12.18	107	107	35.61
35	1137	11.37	12.55	107	107	35.39
36	1175	11.75	12.93	108	108	35.68
37	1212	12.12	13.30	109	109	35.97
38	1250	12.50	13.67	108	108	35.29
39	1288	12.88	14.05	108	108	35.13
40	1325	13.25	14.42	108	108	34.98
41	1363	13.63	14.79	109	109	35.20
42	1401	14.01	15.17	109	109	35.04
43	1439	14.39	15.54	108	108	34.39
44	1476	14.76	15.91	110	110	35.09
45	1514	15.14	16.29	109	109	34.50
46	1552	15.52	16.66	108	108	33.84
47	1589	15.89	17.03	109	109	34.11
48	1627	16.27	17.41	110	110	34.37
49	1664	16.64	17.77	109	109	33.73
50	1702	17.02	18.15	109	109	33.57
51	1739	17.39	18.51	109	109	33.38
52	1777	17.77	18.89	108	108	32.80
53	1814	18.14	19.26	108	108	32.65
54	1851	18.51	19.62	107	107	32.05
55	1888	18.88	19.99	107	107	31.89
56	1926	19.26	20.37	106	106	31.33
57	1963	19.63	20.73	106	106	32.70
58	2001	20.01	21.11	105	105	32.14
59	2026	20.26	21.36	106	106	32.44